

LE BACCALAURÉAT ÈS SCIENCES

RÉSUMÉ DES CONNAISSANCES EXIGÉES PAR LE PROGRAMME OFFICIEL

PAR MM.

J. BRISBARRE, E. BURAT, A. MILNE EDWARDS,
EM. FERNET, O. GRÉARD, E. LEVASSEUR, E. MAUDUIT, A. TISSOT
L. TROOST, CH. VACQUANT

III

Physique; par Em. FERNET, professeur au lycée Bonaparte.

Chimie; par L. TROOST, professeur au lycée Bonaparte.

Histoire naturelle; par A. Milne EDWARDS, docteur ès sciences.

PARIS
VICTOR MASSON ET FILS
PLACE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE

M DCCC LXIV

LE

BACCALAURÉAT

ÈS SCIENCES

RÉSUMÉ DES CONNAISSANCES EXIGÉES PAR LE PROGRAMME OFFICIEL

PAR MM.

J. BRISBARRE, E. BURAT, A. MILNE EDWARDS,
EM. FERNET, O. GRÉARD, E. LEVASSEUR, E. MAUDUIT, A. TISSOT,
A. TROOST, CH. VACQUANT

III

PHYSIQUE; par Em. Fernet, professeur au lycée Bonaparte.

CHIMIE; par L. Troost, professeur au lycée Bonaparte.

HISTOIRE NATURELLE; par A. Milne Edwards, docteur ès sciences.

PARIS
VICTOR MASSON ET FILS
PLACE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE

M DCCC LXIV



III

PHYSIQUE

CHIMIE — HISTOIRE NATURELLE

Cette publication, rédigée par une réunion de professeurs et de membres de l'Université, forme trois beaux volumes in-18 d'ensemble 2,700 pages avec 1,838 figures. Elle embrasse, pour le prix de 23 fr., quatorze traités spéciaux qui résument tout l'enseignement scientifique. Chacun des trois volumes, composé ainsi qu'il suit, est vendu séparément :

LITTÉRATURE; par O. Gréard, professeur au lycée Bonaparte.

PHILOSOPHIE; par J. Brisbarre, professeur au collége Rollin.

HISTOIRE DE FRANCE — GÉOGRAPHIE; par E. Levasseur, professeur au lycée Napoléon.

1 vol. in-18 de 810 pages avec 116 figures. — Prix : 7 fr.

ARITHMÉTIQUE — ALGÈBRE; par E. Mauduit, professeur au lycée Bonaparte.

GÉOMÉTRIE — TRIGONOMÉTRIE; par Ch. Vacquant, professeur de mathématiques spéciales au lycée Napoléon.

APPLICATIONS DE LA GÉOMÉTRIE — COSMOGRAPHIE; par A. Tissot, professeur au lycée Saint-Louis.

MÉCANIQUE; par E. Burat, professeur au lycée Louis-le-Grand.

1 vol. in-18 de 910 pages avec 797 figures. — Prix : 8 fr.

PHYSIQUE; par Em. Fernet, professeur au lycée Bonaparte.

CHIMIE; par L. Troost, professeur au lycée Bonaparte.

HISTOIRE NATURELLE; par A. Milne Edwards, docteur ès sciences.

1 vol. in-18 de 892 pages avec 880 figures. — Prix : 8 fr.

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON, ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.

LE

BACCALAURÉAT

ÈS SCIENCES

SCIENCES PHYSIQUES

PHYSIQUE

LIVRE PREMIER — PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

Notions générales sur la pesanteur. — Usage de la balance.

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LA PESANTEUR.

1. **Pesanteur.** — On appelle *pesanteur* la cause qui sollicite tous les corps à tomber vers la terre, et qui détermine ce mouvement quand les corps sont abandonnés à eux-mêmes. — Si quelques-uns paraissent, dans certaines circonstances, se soustraire à l'action de la pesanteur, comme la fumée, ou les gaz avec lesquels on gonfle les aérostats, ce ne sont là que des exceptions apparentes qui seront expliquées plus loin.

2. **Chute des corps dans le vide.** — Lorsqu'on abandonne, à la même distance du sol et au même instant, des corps de diverses natures ou de diverses formes, comme une balle de plomb, un morceau de liége, une feuille de papier, on constate qu'ils mettent, pour venir rencontrer le sol, des temps très-différents. Ces différences sont dues uniquement à la résistance de l'air : c'est ce que prouve l'expérience suivante.

Un tube de verre (*fig.* 1), ayant environ 2 mètres de long, et fermé à se deux extrémités par des montures de cuivre, contient divers corps tels que des grains de plomb, de petits morceaux de papier, des barbes de plume.

En adaptant sur la machine pneumatique la monture à robinet qui est à l'une des extrémités, on enlève tout l'air que contient ce tube; puis, après avoir fermé le robinet, on saisit le tube avec les deux mains, et, en le retournant brusquement, on fait tomber les corps dans toute sa longueur. On constate qu'ils arrivent tous ***au même instant*** à l'extrémité inférieure. — Si l'on ouvre le robinet pour laisser rentrer un peu d'air, et qu'on recommence l'expérience, on voit le papier et les barbes de plume rester en arrière sur le plomb : le retard est d'autant plus marqué qu'on a laissé rentrer plus d'air.

Fig. 1.

3. **Loi des espaces parcourus par les corps tombant dans le vide.** — Puisque tous les corps prennent dans le vide, sous l'influence de la pesanteur, des mouvements identiques, il suffit d'étudier la loi de la chute pour l'un d'eux. C'est ce qu'on fait, au moyen d'appareils qui seront étudiés en ***mécanique***.

La loi à laquelle conduit l'expérience est la suivante : ***Les espaces parcourus par un corps pesant, tombant librement dans le vide, sont proportionnels aux carrés des temps écoulés depuis le commencement de la chute.*** — L'espace parcouru au bout de la 1re seconde est, à Paris, 4m,9. D'après cela, la loi précédente permet de calculer, pour le même lieu, l'espace parcouru au bout d'un nombre quelconque de secondes : il suffit de multiplier 4m,9 par le carré du nombre qui représente la durée de la chute, exprimée en secondes.

Cette loi relative aux espaces caractérise, comme on le démontre en mécanique, le mouvement ***uniformément accéléré***, c'est-à-dire le mouvement dans lequel ***la vitesse augmente de quantités égales en des intervalles de temps égaux***, et où, par suite, les vitesses aux divers instants sont proportionnelles aux temps écoulés depuis le commencement de la chute. — Le mouvement d'un corps qui tombe est donc un mouvement uniformément accéléré.

On voit immédiatement que la loi des espaces permet de déterminer par l'expérience la hauteur d'un monument, en laissant tomber, du haut de ce monument, un corps choisi de façon que la résistance de l'air ait sur sa chute une influence à peu près nulle, une balle de plomb par exemple, et observant le nombre de secondes qu'elle met à venir rencontrer le sol. — Si la chute a duré 5 secondes, la balle aura parcouru, dans ce temps, $4^m,9 \times 5^2$ ou $122^m,5$: ce sera donc la hauteur du monument.

4. Forces dues à l'action de la pesanteur sur les corps. — Quelque petites que soient les parties dans lesquelles on partage un corps, elles sont *pesantes*, elles tombent si aucun obstacle ne s'oppose à leur chute. On doit donc admettre que la pesanteur donne naissance à des forces qui agissent sur les particules les plus ténues des corps, en les sollicitant vers la terre.

Or, si toutes les particules d'un corps sont liées entre elles d'une manière invariable, c'est-à-dire si leur réunion constitue un corps *solide*, l'action simultanée de toutes les forces produit *les mêmes effets qu'une résultante unique;* c'est par ces effets que nous pourrons étudier les forces dues à l'action de la pesanteur. — Nous allons indiquer comment ils permettent de déterminer :

1° La *direction* des forces dues à l'action de la pesanteur (verticale).

2° Le *point d'application* de leur résultante (centre de gravité).

3° L'*intensité* de leur résultante (poids).

5. Direction de la pesanteur. — Verticale. — Un corps quelconque M (*fig.* 2) étant suspendu à un fil flexible fixé en A, le fil prend une direction qui est évidemment celle de la force P par laquelle le corps est sollicité. — Cette direction est la même quelle que soit la nature du corps. C'est ce qu'on nomme la *verticale*, et l'instrument simple dont nous nous sommes servis pour la déterminer prend le nom de *fil à plomb*.

A

M

P

Fig. 2.

Les verticales menées aux différents points de la terre sont toujours *perpendiculaires à la surface des eaux tranquilles :* d'où il résulte que leurs directions prolongées iraient toutes passer par le centre de la terre. — Donc deux verticales ne sont jamais rigoureusement parallèles; mais, quand elles sont menées en des points voisins, dans une même salle par exemple, ces verticales dont les directions n'iraient se rencontrer qu'au centre de la terre *doivent être considérées comme parallèles :* nous admettrons ce parallélisme dans tout ce qui va suivre.

6. Composition des forces dues à l'action de la pesanteur en une résultante unique. — Poids. centre de gravité. — Les forces dues à l'action que la pesanteur exerce sur les diverses parties d'un corps devant, comme nous venons de le voir, être considérées comme parallèles et de même sens, on démontre en mécanique qu'elles ont une résultante qui leur est parallèle, qui est dirigée dans le même sens, et égale à leur somme. C'est cette résultante qui constitue le *poids* du corps. — On appelle donc *poids* d'un corps, la *résultante des actions de la pesanteur sur toutes les parties de ce corps*. C'est une force *verticale* et égale à la *somme* des forces composantes.

On démontre encore, en mécanique, que la résultante précédente passe par un point qui demeure invariable, quelle que soit la position qu'on

donne au corps dans l'espace. C'est ce point qui constitue le *centre de gravité*. — On appelle donc *centre de gravité* d'un corps, le ***point par lequel passe constamment le poids du corps.***

On voit immédiatement que la considération du *poids* et du *centre de gravité* peut simplifier beaucoup la solution des questions dans lesquelles on doit tenir compte de l'action de la pesanteur sur un corps solide. — En effet, au lieu d'avoir à considérer le corps comme soumis à l'action de forces agissant sur tous ses points, on le considère comme soumis à l'action d'une force unique qui est son poids, cette force étant appliquée en un point qui est son centre de gravité.

7. **Détermination expérimentale du centre de gravité.** — Quand il s'agit d'un corps homogène et ayant une forme symétrique, il est facile de déterminer géométriquement son centre de gravité. Mais, quelles que soient la structure du corps et sa forme, la centre de gravité peut se déterminer par l'expérience, de la manière suivante : — On suspend le corps, par l'un de ses points A, à l'extrémité d'un fil BA (*fig.* 3) : quand l'équilibre est établi, il est évident que le fil est tendu suivant la direction même de la force P qui le sollicite : donc le prolongement du fil doit passer par le centre de gravité. Si l'on suspend maintenant le corps par un autre point C (*fig.* 4), le centre de gravité doit encore se trouver sur le prolongement du fil DC. Comme d'ailleurs il y a toujours un centre de gravité, ces deux droites se rencontrent toujours, et leur point d'intersection donne le centre de gravité G du corps.

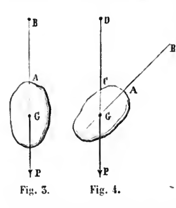


Fig. 3. Fig. 4.

On est souvent conduit à considérer, comme centre de gravité d'un corps solide, un point ne faisant pas partie du corps lui-même. C'est ce qui arrive, par exemple, pour un anneau, dont le centre de gravité est au centre de figure. Alors, si l'on veut encore remplacer, pour la solution d'une question quelconque, l'ensemble des forces qui agissent sur tous les points par une force unique appliquée au centre de gravité, on devra raisonner comme si ce point était lié invariablement au corps solide lui-même.

8. **Détermination expérimentale du poids. — Poids relatifs des corps..** — Le poids d'un corps étant la force résultante de toutes les forces dues à l'action de la pesanteur sur ses divers points, différents corps placés en un même lieu doivent généralement avoir des poids différents. — Le poids, défini comme plus haut (6), varie éga-

lement, pour un même corps, d'un point à l'autre du globe; mais nous laisserons momentanément cette seconde question de côté, pour nous occuper avec détail de la détermination des poids des divers corps *en un même lieu.*

Dans la plupart des cas, on compare le poids des corps, c'est-à-dire la force résultante de l'action exercée par la pesanteur, à l'action exercée dans le même lieu sur un corps déterminé dont on prend le poids pour unité. On a choisi en France le *gramme*, c'est-à-dire le poids d'un centimètre cube d'eau distillée à la température de 4 degrés centigrade. — On appelle alors *poids relatif* d'un corps le *nombre de grammes et de fractions de gramme équivalent à son poids.*

Pour déterminer les poids relatifs des corps on emploie la *balance;* c'est un instrument susceptible d'une grande précision, et dont le fréquent usage justifie les détails dans lesquels nous allons entrer à ce sujet.

USAGE DE LA BALANCE.

9. **Balance.** — La partie principale de la balance est une barre rigide ou fléau AB (*fig.* 5); cette barre est traversée, en son milieu C,

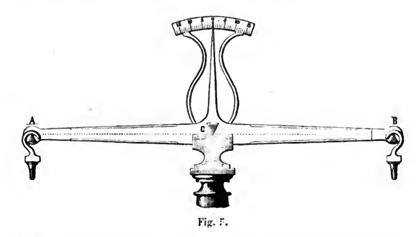


Fig. 5.

par un couteau d'acier trempé, qui fait saillie des deux côtés et dont l'arête inférieure repose, de part et d'autre, sur deux petits plans d'acier trempé ou d'agate; l'un de ces plans est représenté, sur la figure, en avant du fléau; l'autre est en arrière. Le fléau peut osciller librement autour de cette arête; à chacune de ses extrémités est suspendu un plateau destiné à recevoir les corps, ou les poids marqués dont on doit avoir une collection jointe à la balance. Afin de donner aux plateaux le plus de mobilité possible, on a fixé, aux extrémités A et B du fléau, deux couteaux

qui tournent en haut leurs arêtes, sur lesquelles s'appuient les crochets qui supportent les plateaux. Une aiguille perpendiculaire au fléau, en son milieu, se meut avec lui et parcourt un cercle gradué, fixé en arrière à la colonne qui supporte l'appareil : le zéro de la graduation correspond à la position horizontale du fléau, et les divisions marquées de part et d'autre permettent de juger jusqu'à quel point il s'écarte de l'horizontalité.

Les arêtes des trois couteaux A, C, B, étant parallèles et situées dans un même plan, nous les supposerons réduites à trois points situés en ligne droite ; et nous appellerons ***bras du fléau*** les distances du couteau C à chacun des couteaux A et B.

10. **Méthode ordinaire de pesée.** — La méthode la plus simple de pesée consiste à déposer dans un des plateaux le corps dont on cherche le poids, et à placer successivement des poids marqués dans l'autre plateau, jusqu'à ce qu'on parvienne, après quelques tâtonnements, à faire que le fléau s'arrête dans la position horizontale. — On admet alors que la somme des poids marqués qui se trouvent dans l'un des plateaux représente le poids du corps qui est dans l'autre.

En faisant usage de cette méthode, on admet donc :

1° Que la balance est ***juste***, c'est-à-dire que le fléau se tient horizontal quand les poids placés dans les plateaux sont égaux.

2° Que la balance est ***sensible***, c'est-à-dire qu'un poids assez petit, ajouté ou retranché dans l'un des plateaux, dérangerait l'horizontalité du fléau.

Nous allons indiquer comment on peut réaliser ces conditions dans la construction de la balance, et surtout comment on peut vérifier si elles le sont en effet.

11. **Constatation expérimentale de la justesse d'une balance.** — Pour qu'une balance soit juste, c'est-à-dire pour que son fléau se tienne horizontal quand les poids placés dans les plateaux sont égaux, on démontre qu'elle doit satisfaire aux deux conditions géométriques suivantes, conditions que le constructeur doit chercher à réaliser : 1° que le centre de gravité de la partie mobile (fléau et plateaux) soit sur une perpendiculaire à la ligne du fléau passant par le point de suspension, 2° que les deux bras du fléau soient rigoureusement égaux.

Une fois la balance construite, il est facile de vérifier si elle juste, par une simple expérience. — Il suffira d'avoir des corps dont on puisse faire varier les poids à volonté, par exemple de petits vases dans lesquels on mettra progressivement des quantités variables de grenaille de plomb. Après avoir placé immédiatement un poids quelconque dans l'un des plateaux, on règle l'autre de façon que l'aiguille s'arrête au zéro ; l'équilibre étant établi, on transporte dans le plateau de droite le poids qui était à gauche, et réciproquement : si l'aiguille revient au zéro, la balance est juste. En effet,

si la balance était telle qu'il fallût, pour établir l'équilibre, mettre un poids plus grand du côté A, par exemple, que du côté B, on aurait été conduit à faire la charge A plus grande que la charge B ; donc en changeant ensuite ces charges de place sans les modifier, on aurait détruit l'équilibre, et la balance se serait inclinée du côté B. Donc, si le fléau revient à la position horizontale, on peut affirmer que *la balance est juste.*

12. **Conditions de sensibilité.** — On cherche ordinairement, en construisant une balance, à lui donner *le plus de sensibilité possible*, c'est-à-dire à faire que l'équilibre, une fois établi, soit détruit par l'addition du poids le plus petit possible dans l'un des plateaux : on cherche en outre à lui donner une sensibilité *à peu près constante*, quelle que soit la valeur absolue des charges qu'elle aura à supporter. — Pour arriver à ce double résultat, on démontre qu'il aura fallu satisfaire, en la construisant, aux conditions géométriques suivantes : 1° que les trois couteaux soient en ligne droite, 2° que les bras du fléau soient aussi longs et aussi légers que possible, et le centre de gravité du fléau aussi voisin que possible du point d'appui.

Une fois la balance construite, on évaluera son degré de sensibilité en établissant d'abord l'équilibre comme il a été dit, puis cherchant quel est le poids qu'il faut ajouter dans l'un des plateaux pour déranger le fléau de la position horizontale. S'il suffit, par exemple, d'un milligramme, on dira que la balance est *sensible au milligramme.*

Il est très-rare qu'une balance ayant une grande sensibilité absolue puisse conserver cette sensibilité sous des charges un peu grandes. Des charges considérables font fléchir le fléau, et les trois couteaux ne restent plus en ligne droite. On construit alors, pour les divers usages, des balances différentes.— Les unes sont spécialement destinées à peser des poids de quelques grammes ; elles ont un fléau très-léger et très-faible, et peuvent facilement être rendues sensibles au milligramme, ou au demi-milligramme. — Les autres, destinées aux poids de plusieurs kilogrammes, ont un fléau plus lourd et plus résistant, qui peut supporter des charges assez grandes sans fléchir : ces balances sont alors tout au plus sensibles au centigramme ; mais on voit qu'une erreur de quelques centigrammes sur un poids de plusieurs kilogrammes a toujours peu d'importance, en sorte que ces balances ont une précision relative tout à fait comparable à celle des précédentes.

13. **Méthode de la double pesée.** — La méthode de la double pesée, ou *méthode de Borda*, permet de faire une pesée exacte, même avec une balance qui n'est pas juste, pourvu qu'elle soit sensible. — La sensibilité étant d'ailleurs beaucoup plus facilement réalisée dans les balances que la justesse, cette méthode est employée sans cesse pour les déterminations précises, et elle l'est à l'exclusion de toute autre méthode.

On dépose dans l'un des plateaux le corps à peser, et on lui fai équilibre au moyen d'une *tare* placée dans l'autre plateau, c'est-à-dire au moyen d'une quantité de grenaille de plomb ou de sable, qu'on règle de manière que l'aiguille vienne s'arrêter au zéro. On enlève ensuite le corps, et l'on met des poids marqués à sa place, *dans le même plateau*, jusqu'à ce que l'aiguille revienne s'arrêter au zéro. La somme de ces poids représente exactement le poids du corps, indépendamment de la justesse de la balance : en effet, le corps et les poids ont fait successivement équilibre à la tare, dans des conditions absolument identiques. — Pour que le résultat ait quelque précision, il faut que la balance soit sensible, afin qu'on n'ait pas à éprouver d'indécision, quant au nombre exact des poids à employer pour établir l'équilibre.

14. **Balances de précision.** — Les balances dont on fait usage dans les laboratoires ou dans l'industrie, pour les pesées précises, offrent quelques détails de construction, qui sont destinés surtout à assurer et à conserver la sensibilité.

Les oscillations du fléau étant accusées par les mouvements de l'aiguille sur son cadran, elles seront évidemment d'autant plus appréciables que le rayon du cercle sera plus grand, c'est-à-dire que l'aiguille sera plus longue. Pour accroître la longueur de l'aiguille sans augmenter la

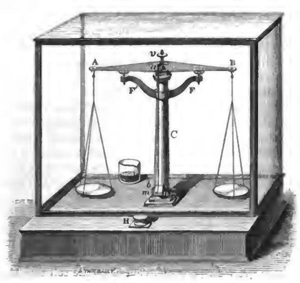


Fig. 6.

hauteur de l'instrument, on emploie une aiguille descendante *ab* (*fig.* 6), dont la longueur peut être rendue presque égale à celle de la colonne

métallique, et dont l'extrémité se meut sur un petit arc de cercle divisé *mn*, fixé à la partie inférieure de la colonne.

Les plans d'agate, qui doivent supporter les couteaux autour desquels s'effectue le mouvement du fléau, sont fixés à l'extrémité d'une tige qui est intérieure à la colonne C de la balance : lorsqu'on soulève cette tige, au moyen d'un mécanisme particulier correspondant à un bouton H qui est extérieur à la cage, les plans d'agate soulèvent eux-mêmes le fléau qui oscille alors librement. Au contraire, lorsqu'on laisse descendre cette tige, le fléau est retenu dans sa descente par les deux fourchettes fixes F, F', et, la tige continuant à s'abaisser, les couteaux restent à une certaine distance de leurs plans : on évite ainsi que les couteaux ne s'usent par le frottement, quand la balance n'est pas en expérience.

Une virole métallique *v*, mobile sur un pas de vis, permet de régler, dans certaines limites, la sensibilité de la balance, en faisant varier un peu la distance du centre de gravité du fléau au point d'appui (12).

Une cage de verre environne la balance, et la préserve des mouvements dus aux courants d'air. — On évite que les pièces d'acier ne s'oxydent, en maintenant toujours dans la cage un vase contenant de la chaux vive ou du chlorure de calcium, afin de dessécher l'air.

PENDULE.

15. **Pendule.** — Le pendule se compose d'une sphère pesante M (*fig.* 7) suspendue à un fil très-flexible et très-fin; ce fil est fixé à son autre extrémité A. L'instrument est en équilibre sous l'action de la pesanteur lorsque le fil est vertical (5); mais si on l'amène dans la position AM' et qu'on l'abandonne ensuite, l'équilibre n'existe plus. En effet, le poids de la sphère P, qui est une force verticale, peut se décomposer en deux forces, l'une Q dirigée suivant le prolongement du fil, et qui n'a d'autre effet que de le tendre, l'autre R perpendiculaire à cette direction dans le plan M'AM, et qui sollicite la sphère à revenir vers le point M : comme il en est de même tant que la sphère est à gauche de M, celle-ci parcourt, avec une vitesse croissante, l'arc de cercle M'M. Arrivée en M, elle dépasse la position d'équilibre, en vertu de la vitesse acquise; mais la composante tangentielle du poids, agissant maintenant en sens contraire du mouvement, diminue peu à peu la vitesse; celle-ci devient nulle en un point M'' qui, d'après la théorie, est le point symétrique de M' par rapport à AM. La sphère revient alors vers M, et accomplit ainsi une série de mouvements alternatifs. — On nomme *oscillation* le mouvement du



Fig. 7.

pendule de l'une des positions extrêmes AM′ à la position extrême opposée AM″; l'*amplitude* de l'oscillation est l'angle M′AM″.

16. **Loi de l'isochronisme des oscillations.** — Lorsqu'on fait osciller un pendule, on reconnaît que, contrairement à la théorie, les amplitudes des oscillations successives ne restent pas égales, mais vont en diminuant peu à peu : ce résultat est dû à la résistance de l'air et à celles qui se développent toujours au point de suspension, de quelque manière que le fil soit assujetti. — Malgré la diminution d'amplitude, la *durée* de chacune des oscillations reste constante. Cette loi, découverte par Galilée en observant les oscillations d'une lampe suspendue à la voûte de la cathédrale de Pise, n'est applicable qu'à des oscillations d'amplitudes très-petites (de 4 à 5 degrés au plus). On l'énonce ordinairement en disant que *les oscillations très-petites sont isochrones*. — On la vérifie par l'expérience en faisant osciller un pendule, et déterminant, avec une montre à seconde, la durée d'une centaine d'oscillations; puis, plus tard, la durée de cent autres, et ainsi de suite.

C'est cette loi de l'isochronisme qui explique comment on régularise le mouvement des horloges, en rendant ce mouvement solidaire de celui d'un balancier qui oscille comme un pendule.

17. **Application du pendule à la détermination des variations d'intensité de la pesanteur.** — Nous avons dit précédemment (5) que le mouvement des corps tombant librement dans le vide est un mouvement uniformément accéléré : la vitesse pendant la durée de la chute augmente donc, au bout d'intervalles de temps successifs égaux à l'unité, d'une quantité constante, qu'on appelle l'*accélération* et que nous désignerons par g. — La théorie et l'expérience s'accordent pour montrer que, en chaque lieu de la terre, l'accélération g est égale au double de l'espace parcouru au bout de la première seconde; en sorte que, à Paris par exemple, l'accélération est égale au double de $4^{m},9$, c'est-à-dire à $9^{m}.8$.

Cela posé, la théorie mathématique du pendule établit que la durée d'une oscillation très-petite est donnée par la formule

$$(1) \quad t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

dans laquelle t est la durée de l'oscillation exprimée en secondes, π le rapport de la circonférence au diamètre, l la longueur du pendule en mètres, et g l'accélération au lieu même de l'expérience.

Supposons donc que l'on connaisse d'une manière précise la *longueur* l d'un pendule, c'est-à-dire la distance du point de suspension A au centre de la sphère M (*fig.* 7), et que l'on détermine avec soin la durée t d'une oscillation (ce qu'on fera en observant le temps que met le pendule à

faire au moins une centaine d'oscillations); la formule (1) permettra de calculer avec précision la valeur de g, pour le lieu où l'expérience aura été faite. — Or l'expérience, refaite ensuite en un lieu suffisamment éloigné du premier, *avec le même pendule*, fournira une autre valeur de la durée t', et par suite une autre valeur de l'accélération g'. — Ainsi de suite pour les différents points de la terre. — On voit donc que les accélérations produites par la pesanteur, dans la chute des corps, varient aux divers points du globe.

D'autre part, la valeur de l'accélération dépend évidemment de l'intensité de la force développée par l'action de la pesanteur sur le corps qui tombe; donc, pour un même corps, l'intensité de l'action de la pesanteur est *variable aux différents points du globe*, et l'on démontre en mécanique qu'elle est exactement *proportionnelle* à l'accélération elle-même. — De là résulte qu'on peut considérer l'accélération g comme mesurant *l'intensité de la pesanteur* en un lieu donné.

L'observation du pendule a montré que l'intensité de la pesanteur va en augmentant quand on va de l'équateur aux pôles : d'après les mesures de Borda, sa valeur exacte est, à l'équateur, $9^m,7800$; à Paris, $9^m,8088$; à la latitude de 80°, $9^m,8293$.— L'observation du pendule a montré également que l'intensité de la pesanteur va en décroissant quand on s'élève dans l'atmosphère.

CHAPITRE II.

Hydrostatique. — Équilibre des liquides. — Principe de la transmission des pressions. Son application à la presse hydraulique. Description succincte de cet appareil. — Liquides superposés.
Vases communiquants. Niveau d'eau.
Pressions exercées par les liquides sur les parois des vases qui les contiennent.
Principe d'Archimède. — Corps flottants.

HYDROSTATIQUE.

18. **Définition des liquides et des gaz.** — Les *corps solides*, dont nous nous sommes occupés jusqu'ici, sont caractérisés par la liaison invariable qui existe entre toutes leurs parties. Un corps solide conserve donc toujours *une forme et un volume constants*, pourvu qu'il n'éprouve ni une action mécanique trop énergique, ni une variation de température.

Un *corps liquide* est un corps *dont le volume reste constant, mais dont la forme dépend toujours de celle du vase qui le contient ;* tels sont le mercure, l'eau. — Ces propriétés peuvent être interprétées en considérant une masse d'eau, par exemple, comme formée de molécules qui peuvent glisser les unes sur les autres, de façon que leur ensemble se moule toujours sur la forme intérieure des vases dans lesquels cette masse d'eau sera

successivement placée. Si l'on admet que, malgré cette mobilité, les molécules soient assujetties à rester toujours à des distances constantes les unes des autres, on concevra que, malgré le changement de forme, le volume reste invariable.

Un *corps gazeux* est un corps dont *la forme et le volume sont essentiellement variables, et qui tend généralement à occuper en totalité l'espace dans lequel il peut s'étendre;* tels sont l'air, l'hydrogène. — Un gaz exerce en effet toujours, sur les parois des enveloppes qui le contiennent, un effort tendant à les agrandir, et qu'on nomme la *tension* ou la *force élastique* du gaz.

Cette propriété des gaz est mise en évidence par l'expérience suivante : une vessie garnie d'un robinet *r* (*fig.* 8), et contenant un peu d'air, est placée sous une cloche dont l'intérieur communique avec le corps de pompe d'une machine pneumatique : lorsque, en faisant fonctionner la machine, on enlève l'air qui entoure la vessie, on la voit se gonfler jusqu'à remplir presque complétement la cloche : donc, si la vessie ne se distendait pas lorsqu'elle était à l'air libre, c'est que la tension du gaz qu'elle contient était équilibrée par celle du gaz environnant. La vessie s'affaisse d'ailleurs de nouveau dès qu'on laisse rentrer l'air dans la cloche, par le robinet R.



Fig. 8.

Ces résultats de l'expérience peuvent s'interpréter en considérant un gaz comme formé de molécules qui tendent toujours à s'écarter les unes des autres, de sorte que leur ensemble, occupant tout l'espace dans lequel il peut se répandre, exerce encore une pression sur les obstacles qui empêchent son volume de s'accroître davantage.

19. **La force élastique d'un gaz augmente quand on diminue son volume.** — Ce principe, sur lequel nous reviendrons avec détails, peut se démontrer, sans prendre aucune mesure précise, au moyen du *briquet à air.* — Un tube de verre très-épais AB (*fig.* 9) est mastiqué dans une monture qui ferme hermétiquement l'extrémité B : par l'autre extrémité, on introduit un piston C garni de cuir et bien graissé, en sorte qu'il glisse facilement dans le tube, tout en s'appliquant exactement sur la paroi intérieure; on enferme donc ainsi dans l'appareil un certain volume d'air. On constate d'abord que, si l'on appuie avec la main sur la tige du piston, on peut l'enfoncer assez loin dans le tube : ce qui prouve que le volume des gaz diminue beaucoup pour des pressions qui ne feraient pas varier le volume d'un liquide d'une manière

appréciable. On observe ensuite que la résistance offerte par le gaz s'accroît à mesure qu'on en réduit le volume.

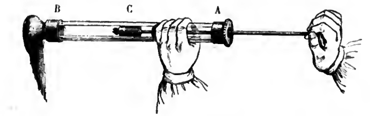


Fig. 9. — Briquet à air.

Cet appareil a reçu le nom de briquet à air, parce qu'une compression brusque de l'air produit une élévation de température, qui peut allumer un morceau d'amadou fixé à la face intérieure du piston.

20. **Fluides en général. — But de l'hydrostatique.** — Les liquides et les gaz se ressemblent par la variabilité de leur forme, c'est-à-dire par la mobilité de leurs molécules. Cette propriété, qui les distingue essentiellement des corps solides, leur a fait donner le nom général de *fluides.*

D'autre part, des pressions assez considérables ne font éprouver aux liquides que des changements de volume inappréciables. On peut donc désigner les liquides sous le nom de *fluides incompressibles.* — Les changements de pression exercent au contraire sur les volumes des gaz une influence toujours sensible, et qui sera étudiée plus loin. Les gaz peuvent donc être appelés *fluides élastiques.*

L'*hydrostatique* est l'étude des fluides en général, considérés à l'état d'équilibre. — Nous nous occuperons d'abord des principes relatifs à l'équilibre des liquides. Tous ces principes seront d'ailleurs applicables aux corps gazeux ; il nous suffira, pour compléter l'étude de l'équilibre des gaz, de tenir compte de leur compressibilité et de leur force élastique.

ÉQUILIBRE DES LIQUIDES.

21. **Principe fondamental. Transmission des pressions.** — *Lorsqu'une pression déterminée s'exerce sur une portion plane de la surface d'un liquide, elle se transmet avec la même intensité à toute portion de paroi plane ayant une surface égale.*

Ce principe, qui est dû à Pascal, peut être vérifié approximativement par l'expérience, de la manière suivante. — Soient deux tubes cylindriques verticaux A et B (*fig.* 10), contenant chacun un piston P, *p*, et réunis à leur base par un tube de communication CD ; l'espace com-

pris intérieurement entre les deux pistons est plein d'eau. Si la surface du piston P est, par exemple, 100 fois plus grande que celle du piston P, et si l'on place sur le piston *p* un poids de 4 kilogrammes, il faudra, pour empêcher le piston P de s'élever dans le cylindre A, le charger d'un poids 100 fois plus grand, c'est-à-dire d'un poids de 400 kilogrammes. — On voit donc que chacune des parties égales à *p*, dans lesquelles on peut décomposer le piston P, éprouve une pression qui est la centième partie de 400 kilogrammes, c'est-à-dire la pression même qui s'exerce sur le piston *p*.

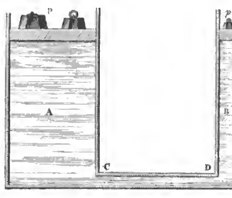


Fig. 10.

Pour faciliter la vérification expérimentale du principe de la transmission des pressions, nous avons donné, à l'enveloppe ACDB qui contient le liquide, une forme particulière ; cette forme est telle que, d'une part, la pression exercée sur le piston *p* puisse être produite par un poids placé sur ce piston, et que, d'autre part, la pression supportée par le piston P puisse également être équilibrée par l'addition d'un poids. Mais le principe est vrai quelle que soit la forme de l'enveloppe du liquide, et quelle que soit la position des parois considérées. — Ainsi, un liquide étant placé dans une enveloppe de forme quelconque PQRS (*fig.* 11) qu'il remplit complètement, supposons que la paroi RS offre une ouverture garnie d'un piston *p* dont la surface soit de 20 centimètres carrés, et qu'on exerce, ***perpendiculairement à la surface de ce piston***, une pression de 4 kilogrammes, c'est-à-dire une pression égale à la pression verticale qu'exercerait un poids de 4 kilogrammes placé sur une surface horizontale. Un piston *p'*, adapté à une ouverture de la paroi S P et ayant une surface de 60 centimètres carrés, c'est-à-dire triple de la précédente supportera intérieurement et ***perpendiculairement à sa surface*** une pression triple, en sorte que, pour le maintenir en équilibre, il faudra exercer extérieurement et perpendiculairement à sa surface une pression de 12 kilogrammes. De même, un piston *p"*, placé en un autre point quelconque de

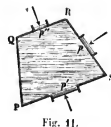


Fig. 11.

l'enveloppe et offrant une surface de 10 centimètres carrés, sera maintenu en équilibre par une pression de 2 kilogrammes. — Tout ce qui vient d'être dit n'est d'ailleurs rigoureusement vrai qu'autant qu'on peut négliger les pressions dues au poids du liquide lui-même; si ces pressions ne sont pas négligeables, elles s'ajoutent, comme on verra plus loin, aux pressions transmises.

Enfin, dans tous les cas, les vérifications expérimentales du genre de celles que nous venons d'indiquer ne peuvent pas être regardées comme très-précises, à cause des frottements qui s'exercent à la surface des pistons : on doit considérer le principe de la *transmission des pressions* comme démontré plutôt par la vérification de ses diverses conséquences que par des expériences directes.

22. Application du principe précédent à la presse hydraulique. — L'appareil de la figure 10 n'est autre que la *presse hydraulique*, réduite à ses éléments essentiels. Nous allons maintenant indiquer rapidement les principaux détails de construction qui la rendent applicable aux usages de l'industrie : la plupart de ces détails ont été introduits longtemps après que Pascal eut indiqué le principe de l'appareil.

Le petit piston, fixé à la partie inférieure de la tige KF (*fig.* 12), est mis en mouvement au moyen d'un levier GH mobile autour du point H ;

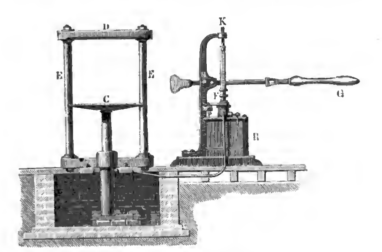


Fig. 12. — Presse hydraulique.

le cylindre ou *corps de pompe* dans lequel se meut ce piston plonge dans un réservoir d'eau R ; les mouvements alternatifs du piston ont pour effet d'aspirer l'eau du réservoir dans le corps de pompe quand le piston

s'élève, et de refouler cette eau, quand le piston s'abaisse, dans un tube latéral qu'on aperçoit en avant de la figure. Ce tube vient s'ouvrir dans le cylindre qui contient le gros piston ; celui-ci porte, à sa partie supérieure, un plateau C; au-dessus du plateau, se trouve une plate-forme D invariablement reliée au cylindre par des colonnes de fonte E, E. Les objets que l'on veut soumettre à l'action de la presse sont placés entre C et D ; lorsque, en faisant manœuvrer avec la main l'extrémité G du levier, on refoule successivement l'eau du réservoir dans le gros cylindre, le plateau C s'élève, et comprime ces corps contre la plate-forme D. — La pression qu'on exerce en G donne naissance, grâce à l'emploi du levier, à une pression plus grande sur le piston F, puisque ces pressions sont inversement proportionnelles aux deux bras du levier : d'autre part, la pression exercée sur le piston F produit sous le gros piston une pression beaucoup plus grande encore, puisque les pressions sont directement proportionnelles aux surfaces de ces pistons. On voit donc que, en définitive, avec un effort relativement faible, on peut exercer des pressions extrêmement considérables.

Il est facile de concevoir l'importance d'éviter ici les fuites qui pourraient laisser échapper l'eau sur le contour du gros piston. Pour y parvenir, on fait usage d'un ***piston plongeur***, c'est-à-dire d'une masse cylindrique de métal, d'une hauteur presque égale à celle du tube dans lequel elle doit se mouvoir, et semblable à celle qui est représentée en P dans la figure 67. Elle ne touche pas la paroi interne du cylindre, mais elle traverse à frottement une garniture particulière, assujettie à l'intérieur du renflement qu'on voit à la partie supérieure. Cette garniture, qui a été imaginée par Bramah et qui a permis d'introduire définitivement dans l'industrie l'usage de la presse hydraulique, est représentée en coupe verticale par la figure 15. C'est une couronne de cuir, dont les bords ont été repoussés au maillet, de façon à lui donner la forme d'une sorte de gouttière renversée. L'eau, en pressant à l'intérieur de cette gouttière, applique son bord interne contre la surface du piston, et son bord externe contre la paroi du cylindre ; et cela, avec d'autant plus de force que la pression exercée dans l'appareil est plus grande.



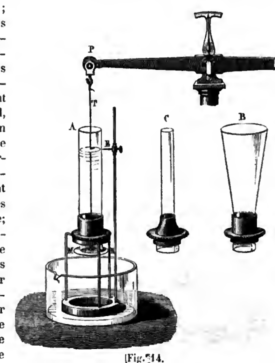
Fig. 15.

23. **Équilibre d'un liquide soumis à la seule action de la pesanteur. — Horizontalité de la surface.** — Un liquide en repos, dans un vase ouvert de forme quelconque, se dispose toujours de façon que sa surface libre soit plane. L'observation montre en outre que cette surface est perpendiculaire à la direction du fil à plomb, c'est-à-dire que c'est une surface *horizontale*. — Si, en agitant le vase, on altère momentanément la forme de la surface, elle revient bientôt, sous l'action de la pesanteur, à celle que nous venons d'indiquer.

Or l'action de la pesanteur, qui s'exerce sur toutes les molécules d'un liquide, détermine toujours, alors même qu'on n'exerce sur lui aucune action extérieure, une pression qui se transmet aux parties inférieures de la masse. On conçoit donc que, eu égard à cette action, le fond ou les parois latérales des vases doivent supporter des pressions qui dépendent de leur profondeur au-dessous de la surface libre. — C'est ce que nous allons constater par l'expérience.

24. **Pression sur le fond horizontal d'un vase.** — ***La pression exercée par un liquide pesant sur le fond horizontal du vase qui le contient est égale au poids d'une colonne cylindrique de liquide ayant pour base la surface totale du fond du vase, et pour hauteur la hauteur du liquide au-dessus de cette surface.*** — D'après cet énoncé, on voit que la pression ne doit dépendre en aucune façon de la ***forme*** du vase, mais seulement de la ***surface du fond*** et de la ***hauteur du liquide.***

Pour démontrer par l'expérience le principe énoncé, prenons trois vases A, B, C (*fig.* 14) de formes différentes, et pouvant se visser tour à tour sur un trépied métallique; ces vases n'ont pas de fond, mais présentent à leurs parties inférieures des ouvertures ***égales.*** — L'un d'eux A étant vissé sur le trépied, on applique sur son ouverture inférieure un obturateur de verre MN, qu'on maintient en le suspendant par un fil T à l'un des bras P d'une balance; on place, dans le plateau que supporte l'autre bras, des poids suffisants pour appliquer assez fortement l'obturateur sur l'ouverture. On verse alors de l'eau dans le vase A jusqu'à ce que, la pression de cette eau faisant équilibre à la force qui maintenait l'obturateur, ce-



(Fig. 14.

lui-ci se détache et laisse échapper quelques gouttes de liquide : on marque alors la hauteur de l'eau au moyen du petit index E, mobile sur la tige verticale qui est fixée au trépied. On répète la même expérience, en remplaçant le vase A successivement par les vases B et C : on constate que, l'index étant resté au même point de la tige, l'obturateur se détache toujours au moment où le liquide atteint ce niveau. — La pression est donc ici *la même* sur le fond de ces trois vases, quand le liquide atteint la même hauteur au-dessus du fond.

Quant à la valeur absolue de cette pression, on peut la déterminer en plaçant sur l'obturateur, au lieu d'eau, un nombre convenable de grammes et de fractions de grammes : on trouve que le poids nécessaire pour le détacher est précisément égal au poids total de l'eau qu'on a dû verser dans le vase *cylindrique* A, ce qui vérifie l'énoncé.

On voit donc que, pour le vase B, la pression est inférieure au poids de l'eau que contient le vase ; elle est, au contraire, pour le vase C, supérieure au poids total de l'eau. — On va trouver l'explication de ce résultat dans les pressions supportées par les parois latérales[1].

25. **Pressions sur les parois latérales.** — Lorsqu'on vient à pratiquer une ouverture dans la paroi latérale d'un vase qui contient un liquide pesant, on voit le liquide s'échapper en formant un jet, qui s'infléchit sous l'action de la pesanteur, mais qui est d'abord perpendiculaire à la paroi. Cette dernière remarque montre que les molécules liquides voisines de la paroi étaient pressées normalement contre elle, et par suite exerçaient aussi sur elle une pression normale.

Cela posé, il est facile de concevoir en quoi la *pression exercée sur le fond* du vase se distingue du *poids du liquide*, c'est-à-dire de la force qui solliciterait, par exemple, le plateau d'une balance, sur lequel on aurait placé ce vase. — Le liquide contenu dans un vase exerce sur tous les éléments d'une paroi latérale des pressions normales à ces éléments ; si les éléments d'une paroi telle que AB (*fig.* 15) font un angle obtus avec le fond, chacune de ces pressions p peut se décomposer en deux forces : l'une horizontale f', l'autre f verticale et dirigée de haut en bas. Toutes les composantes verticales, agissant sur les divers points de la paroi qui sont liés entre eux, s'ajoutent à la pression supportée par le fond, et c'est la résultante totale de toutes ces forces qui solliciterait le plateau d'une balance sur lequel serait placé le vase ; en d'autres termes, c'est elle qui représente le poids du liquide : ce poids est donc

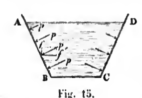


Fig. 15.

[1] Ce résultat, qui paraît singulier au premier abord, a été désigné par quelques physiciens sous le nom de *paradoxe hydrostatique*.

plus grand que la pression supportée par le fond. — Au contraire, si les éléments d'une paroi telle que A′ B′ (*fig.* 16) font un angle aigu avec le fond, les composantes verticales *f* des pressions exercées sur ces éléments sont dirigées de bas en haut : ces forces agissent donc en sens contraire de la pression exercée sur le fond, et, en se composant avec cette pression, elles produisent une résultante totale qui est égale au poids du liquide; ce poids est donc moindre que la pression supportée par le fond.

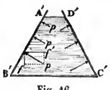


Fig. 16.

26. *Mouvement de recul produit par l'écoulement d'un liquide.* — Lorsqu'on place un vase plein d'eau sur un petit chariot parfaitement mobile, et qu'on vient à déboucher une ouverture vers la partie inférieure de ce vase, on voit le chariot reculer en sens inverse de l'écoulement. Ce résultat trouve son explication dans ce qui précède. — Soit, en effet, un vase ABCD (*fig.* 17), et supposons, pour plus de simplicité, que les parois latérales opposées AB, CD soient planes, verticales et parallèles. Soit *m′ n′* la portion de paroi que l'on supprime pour produire l'écoulement : avant que cette ouverture ne fût débouchée, la pression *p′* supportée par cette portion de paroi était équilibrée par la pression *p* égale et contraire, qui s'exerce sur la portion *mn* égale à la première et située à la même profondeur sur la paroi opposée. Au moment où l'on enlève *m′ n′*, la pression *p′* a pour effet de faire jaillir le liquide, tandis que la force *p*, qui reste seule appliquée au vase, le fait reculer en sens inverse de l'écoulement s'il est placé sur un support mobile.

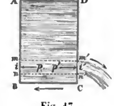


Fig. 17.

Le mouvement du *tourniquet hydraulique* (*fig.* 18) s'explique de la même manière. — Cet appareil se compose d'un réservoir de verre MN, parfaitement mobile autour d'un axe vertical, et communiquant, par sa partie inférieure, avec un tube de cuivre horizontal *ab*, recourbé en forme de Z. Le réservoir ayant été rempli

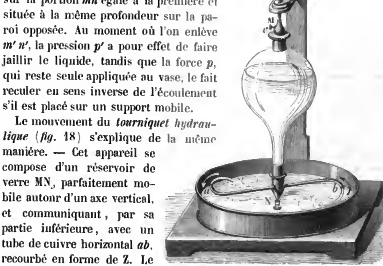


Fig. 18. — Tourniquet hydraulique.

d'eau, au moment où l'on débouche les extrémités *a* et *b* du tube, on voit l'appareil prendre un mouvement de rotation en sens inverse de l'écoulement du liquide : ce mouvement de recul est encore produit par les pressions du liquide sur les portions du tube opposées aux ouvertures.

27. **Pression supportée de bas en haut par une surface horizontale, prise dans un liquide pesant.**— L'expérience suivante prouve qu'une surface horizontale, prise dans l'intérieur d'un liquide pesant, éprouve, de bas en haut, une pression verticale dont il est facile d'obtenir la valeur. On prend un large tube de verre, fermé à sa partie inférieure par un disque plan *ab* (*fig.*19) que l'on maintient d'abord au moyen d'un fil fixé en son centre; si l'on enfonce ce tube dans l'eau on constate que le disque est appliqué fortement sur l'ouverture : on peut abandonner le fil, sans que le disque se détache. — Si maintenant on veut évaluer la pression qui s'exerce sur la face inférieure de *ab*, il suffit de verser, avec précaution, de l'eau dans le tube : le disque se détachera au moment où le niveau intérieur arrivera sensiblement sur le plan du niveau extérieur. Or, à ce moment, le tube fermé par son obturateur constitue un vase sur le fond duquel s'exerce, de bas en haut, une pression verticale que nous savons évaluer (24) : cette pression est équivalente à celle qui s'exerce, de haut en bas, sur la face inférieure de l'obturateur. Donc la surface inférieure de *ab* supporte, de bas en haut, une pression égale *au poids d'une colonne cylindrique de liquide ayant pour base cette surface, et pour hauteur la hauteur du liquide au-dessus de ab.*



Fig. 19.

28. **Égalité de pression en tous sens, autour d'un point pris dans l'intérieur d'un liquide en équilibre.** — Si l'on considère un point quelconque, dans l'intérieur d'un liquide en équilibre, et une petite portion de surface plane passant par ce point, il est clair que l'équilibre ne serait point troublé si les points du liquide contenus dans cette petite surface étaient liés entre eux, de manière à former un corps solide. Or, si nous considérons en particulier le cas où la surface en question est horizontale, et où le liquide est placé dans un vase ouvert, nous venons de constater par l'expérience qu'elle supporte à la fois sur ses deux faces des pressions égales et directement opposées. — La théorie montre qu'il en est de même quelle que soit la direction de la surface considérée, pourvu qu'elle soit de petite dimension. Ces conclusions sont d'ailleurs applicables non-seulement aux pressions dues à l'action de la pesanteur sur les parties supérieures du liquide, mais aussi à celles qui proviennent d'actions extérieures.

On peut donc dire d'une manière générale que si, par un point M, pris dans l'intérieur d'un liquide (*fig.* 20), on imagine une portion de paroi plane, dont les dimensions soient constantes et assez petites, elle supporte sur ses deux faces des pressions *p*, *p'* égales entre elles, et dont la valeur est la même quelle que soit la direction *mn*, *m'n'*... de la surface considérée. — Tel est le sens qu'il faut attacher au principe connu sous le nom *d'égalité de pression dans les sens autour d'un point*.

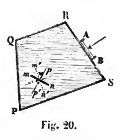


Fig. 20.

29. Égalité de pression dans tous les points d'un même plan horizontal pris dans un liquide pesant. — La pression qui s'exerce sur une petite portion de surface plane, prise au sein d'un liquide placé dans un vase ouvert, est toujours égale, comme on vient de voir, au point d'une colonne cylindrique de liquide ayant pour base cette surface et, pour hauteur, la hauteur du liquide au-dessus d'elle. Si donc on considère plusieurs petites surfaces *égales entre elles* et prises dans un même plan horizontal, comme elles sont toutes à la même distance de la surface, elles supportent des pressions égales. — La théorie montre qu'il en est encore de même quand il s'agit d'un liquide pesant placé dans un vase fermé et soumis à des pressions extérieures quelconques, en sorte que, dans tous les cas: *Les pressions supportées par des surfaces égales, prises dans un même plan horizontal, sont égales entre elles.*

Nous aurons à faire de fréquentes applications des deux principes qui précèdent : ils vont nous permettre, par exemple, de prévoir les conditions d'équilibre des liquides qui sont superposés dans un même vase, et celles des liquides placés dans des vases communiquants.

30. Conditions d'équilibre des liquides superposés. — Quand plusieurs liquides non miscibles sont placés dans un même vase ABCD (*fig.* 21), il faut, pour qu'il y ait équilibre, que *la surface de séparation soit plane et horizontale.* — En effet, si la surface de séparation avait une forme telle que EF, il serait impossible que tous les éléments égaux *m*, *m'*, pris dans les divers points d'un plan horizontal EF situé au-dessous de cette surface, fussent soumis à la même pression.

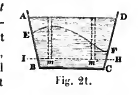


Fig. 21.

Pour que l'équilibre subsiste, il faut encore que les liquides soient superposés par ordre de densités décroissantes à partir du fond.

Ces résultats peuvent être vérifiés par l'expérience, en plaçant dans un

même vase du mercure, de l'eau et de l'huile : les surfaces des trois liquides sont horizontales, et l'ordre de superposition à partir du fond du vase est celui dans lequel nous venons de les énumérer.

31. **Conditions d'équilibre des liquides placés dans des vases communiquants.** — 1° *Lorsque plusieurs vases communiquants contiennent un même liquide, il faut, pour qu'il y ait équilibre, que les surfaces libres soient dans un même plan horizontal.* — Soient V et V' (*fig.* 22) deux vases communiquants, contenant un même liquide, et considérons un petit élément *mn* dans le tube de communication; il devra supporter sur ses deux faces des pressions normales *p* et *p'* égales entre elles. Or, le plan mené par *mn* pourrait être rendu solide sans que l'équilibre fût détruit; donc l'élément *mn* lui-même, considéré comme une portion de paroi du vase V, supporte de ce côté une pression *p* équivalente au poids d'un cylindre liquide qui aurait pour base *mn*, et pour hauteur la distance de *mn* au plan de la surface AB ; la pression *p'* est exprimée par une colonne de liquide ayant pour base *mn* et pour hauteur la distance de *mn* au plan mené par CD. Donc ces deux hauteurs doivent être égales, et les plans des deux surfaces AB, CD doivent se confondre.

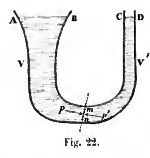


Fig. 22.

On vérifie ce résultat par l'expérience, en faisant communiquer le vase V (*fig.* 23), soit avec le tube vertical A, soit avec l'un des tubes B,

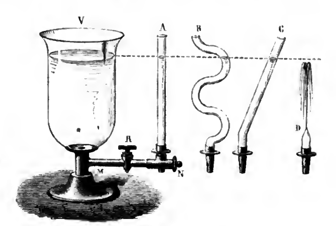


Fig. 23.

C, qu'on peut substituer à A. Le robinet R étant ouvert, on voit le liquide s'élever toujours de façon que sa surface se trouve dans le même plan horizontal que la surface libre en V. — Si l'on adapte en N un tube tel que D, qui n'arrive pas jusqu'à cette hauteur, il se produit un jet d'eau qui atteint encore à peu près le même niveau : la petite différence de hauteur que l'on constate alors par l'expérience doit être attribuée surtout à la rencontre des gouttes qui montent et de celles qui descendent, rencontre qui a pour effet de diminuer la vitesse ascensionnelle. C'est sur ces principes qu'est fondé l'établissement de la plupart des ***jets d'eau*** artificiels, et aussi l'ascension de l'eau au-dessus du sol dans les ***puits artésiens*** qui seront étudiés en géologie.

2° ***Lorsque deux vases communiquants contiennent deux liquides différents superposés, il faut, pour qu'il y ait équilibre, que les hauteurs des deux liquides au-dessus de la surface de séparation soient en raison inverse de leurs densités.***

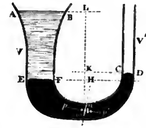


Fig. 24.

Soient deux vases communiquants V, V′ (*fig.* 24) : supposons qu'on y ait d'abord versé du mercure, et qu'on ait ensuite ajouté de l'eau dans le vase V : le niveau du mercure s'est déprimé à gauche, s'est élevé à droite; considérons le moment où l'équilibre est établi. Un élément *mn* pris dans le tube de communication doit supporter, de part et d'autre, des pressions normales p et p' égales entre elles. Or, ces pressions ont une partie commune, savoir le poids d'une colonne de mercure ayant pour base *mn* et pour hauteur la distance IH de *mn* à la surface de séparation EF; donc il doit y avoir égalité entre le poids d'une colonne d'eau ayant pour base *mn* et pour hauteur HL, et le poids d'une colonne de mercure ayant même base et pour hauteur HK. Le mercure ayant une densité qui est égale à celle de l'eau multipliée par 13, 6, la hauteur HK doit être égale à $\frac{\text{HL}}{13{,}6}$ ou, en d'autres termes, les hauteurs des liquides, *au-dessus de la surface de séparation* EF, doivent être en raison inverse de leurs densités.

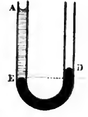


Fig. 25.

On peut faire l'expérience, au moyen d'un simple tube en forme d'U (*fig.* 25), dont les deux branches représentent les vases V et V′; la mesure directe des colonnes liquides confirme les conclusions précédentes.

32. Niveau d'eau. — L'usage du *niveau d'eau* dans l'arpentage est fondé sur le principe des vases

communiquants, dans le cas d'un seul liquide. Un tube de métal (*fig.* 26) dont les extrémités, coudées à angle droit, reçoivent deux fioles de verre sans fond M, N, contient de l'eau ; on place ce tube à peu près horizontalement sur un trépied, de sorte que les surfaces du liquide soient visibles dans les deux fioles : d'après ce qui précède, le plan mené par les deux surfaces M et N est un plan horizontal.



Fig. 26. — Niveau d'eau.

Supposons qu'il s'agisse de déterminer la différence de niveau de deux points B et B′ pris sur un terrain (l'un de ces deux points est indiqué sur la figure 27, l'autre est supposé à gauche de cette figure, en dehors des limites du dessin). L'arpenteur installe l'instrument en un point intermédiaire A, et fait dresser en B, par un aide, une règle graduée; sur cette règle se meut une plaque métallique P, partagée en quatre carrés, dont deux sont peints en blanc et les deux autres en rouge ; c'est ce qu'on nomme la *mire*. Alors, plaçant l'œil à la surface du liquide en M, il fait signe d'élever ou d'abaisser la plaque P, jusqu'à ce qu'il aperçoive le centre sur le prolongement du rayon visuel qui rase la surface de l'eau en N; on lit alors sur la règle la hauteur BP. — Puis, sans toucher au niveau d'eau, l'arpenteur fait transporter la mire au point B′, et, plaçant son œil en N, il détermine la position P′ de la plaque qui se trouve sur le même plan horizontal que P. La différence des hauteurs BP, B′P′ donne la différence de niveau des deux points du terrain B, B′.

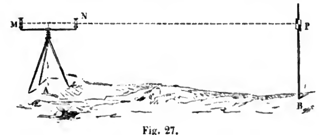


Fig. 27.

PRINCIPE D'ARCHIMÈDE. — CORPS FLOTTANTS.

33. **Principe d'Archimède**. — *Tout corps plongé dans un liquide pesant éprouve une poussée verticale, de bas en haut, dont la valeur est égale au poids du liquide déplacé.*

On peut se rendre compte de l'existence de cette poussée et de sa valeur par le raisonnement suivant. Soit un liquide pesant en équilibre, et supposons qu'une portion MN de la masse (*fig.* 28) soit solidifiée sans changer de poids, ni de volume. Ce corps solide restera en équilibre au milieu du liquide : donc les pressions qui s'exercent sur toute sa surface ont une résultante qui est égale et directement opposée à la résultante des actions de la pesanteur, c'est-à-dire à son poids P. — Or, toutes ces pressions seront encore les mêmes si l'on substitue, à ce corps solide idéal, un autre corps solide de même forme, mais de nature différente. Un corps quelconque, plongé dans un liquide, éprouve donc une *poussée* de bas en haut, dont la valeur est égale au poids du liquide déplacé.

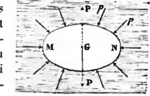


Fig. 28.

Cette valeur de la poussée peut être constatée par l'expérience. —

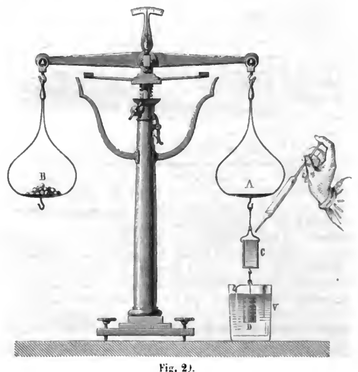


Fig. 29.

Deux cylindres de laiton, l'un plein D (*fig.* 29), l'autre creux C, ont été

travaillés de telle sorte que le cylindre plein entre exactement dans le cylindre creux. On suspend sous l'un des plateaux A de la balance hydrostatique le cylindre creux, et, au-dessous de lui, le cylindre plein; on fait la *tare* dans le plateau B. On descend ensuite le cylindre D dans un vase contenant de l'eau, et l'on constate que l'équilibre est détruit. Il suffit alors d'emplir d'eau la capacité C pour que, le cylindre D étant complétement plongé, l'équilibre soit rétabli. On voit donc qu'on a équilibré la poussée éprouvée par D en ajoutant, au poids du système, un poids d'eau précisément égal à celui qui est déplacé par D.

54. **Conséquences du principe d'Archimède. — Corps flottants.** — De ce qui précède il résulte que, si l'on compare la *poussée* éprouvée par un corps plongé au *poids* de ce corps, on pourra, selon les circonstances, distinguer trois cas :

1° *Si le poids est plus grand que la poussée*, ou, en d'autres termes, si le corps a un poids plus grand que le poids du même volume de liquide, tout se passe comme s'il était sollicité par une force égale à la différence de ces deux poids, et qu'on peut appeler son *poids apparent*. On exprime souvent ce résultat en disant qu'*un corps plongé dans un liquide perd une partie de son poids égale au poids du liquide déplacé*. — Dans ce cas, le corps abandonné au milieu du liquide tombe au fond. C'est ce qui arrive pour le fer, pour les pierres, quand on les plonge dans l'eau; pour le platine, quand on le plonge dans le mercure.

2° *Si le poids est égal à la poussée*, c'est-à-dire si le corps a un poids égal à celui du même volume de liquide, il semble avoir perdu complétement son poids. — Abandonné sans impulsion au milieu du liquide, il y reste en équilibre sans descendre, ni monter.

3° Enfin, *si le poids est plus petit que la poussée*, c'est-à-dire si le corps a un poids moindre que le poids du même volume de liquide, la poussée l'emporte, et le corps s'élève dans le liquide comme s'il était sollicité de bas en haut par une force égale à la différence entre la poussée et le poids. C'est ce qui arrive pour le bois, le liége plongés dans l'eau; pour le fer plongé dans le mercure.

Remarque. — Dans ce dernier cas, il est essentiel de remarquer que le corps, en s'élevant dans le liquide, finit par arriver à la surface; alors, une portion de ce corps venant à émerger, la quantité de liquide déplacé diminue, et il s'établit un équilibre entre le poids du corps qui est resté constant, et la poussée qui a acquis une valeur moindre. — On arrive donc à cette conséquence que *toutes les fois qu'un corps flotte à la surface d'un liquide, le poids du corps est égal au poids de liquide que déplace la partie plongée.* — Nous aurons souvent à rappeler ce résultat.

55. **Ludion.** — On réalise facilement les conditions diverses dans lesquelles un corps solide descend, monte ou se tient en équilibre dans un liquide, au moyen du *ludion* (*fig.* 30). — Dans une éprouvette entière-

ment pleine d'eau, on a placé une boule de verre creuse B. percée vers sa partie inférieure d'une petite ouverture capillaire (placée à gauche sur la figure); cette boule de verre supporte une figurine d'émail, dont le poids a été réglé de façon que, la boule étant vide, le système ait un poids total moindre que celui de l'eau déplacée, et tende à monter à la surface du liquide. Une membrane, solidement ficelée sur le bord de l'éprouvette, permet d'exercer avec le doigt une pression sur la surface de l'eau; cette pression, se transmettant dans toute la masse, fait pénétrer dans la boule de verre, par l'ouverture capillaire, un peu de liquide qui comprime l'air de la boule, et le poids du système se trouve augmenté du poids de cette eau : on parvient ainsi facilement à faire descendre le ludion jusqu'au fond. — Si l'on vient à supprimer la pression, la force élastique de l'air chasse de la boule l'eau qui y était entrée, et le petit système remonte. — Enfin, on peut, avec quelques tâtonnements, régler la pression de manière à maintenir la boule au milieu de l'éprouvette; à ce moment, le poids total du système mobile est égal au poids de l'eau qu'il déplace.

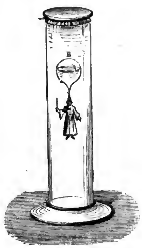


Fig. 30. — Ludion.

CHAPITRE III.

Mesure de la densité des solides et des liquides. — Aréomètres.

DENSITÉ DES SOLIDES ET DES LIQUIDES.

36. **Définitions.** — On appelle *poids spécifique* d'un corps *le poids de l'unité de volume de ce corps.* — A ce terme on substitue souvent celui de *densité,* que nous considérerons comme synonyme[1].

De cette définition il résulte que si l'on connaît le poids total P d'un corps, et son volume V, sa densité sera donnée par la formule

$$(1) \qquad D = \frac{P}{V}.$$

37. *Remarque essentielle sur le choix des unités.* — Les nombres P

[1] Bien qu'on établisse en mécanique une distinction précise entre ces deux termes, nous n'indiquons pas ici cette distinction qui pourrait difficilement être comprise sans quelques développements. — Il n'y a d'ailleurs aucun inconvénient à confondre les deux expressions, dans les cas où nous aurons à les employer.

et V étant déterminés, l'un au moyen de l'unité de poids, l'autre au moyen de l'unité de volume, la densité D dépend du choix de ces unités.

Prenons pour unité de volume le *centimètre cube ;* prenons pour unité de poids le *gramme*, qui est alors le poids de l'unité de volume d'eau à 4 degrés centigrades. Avec ces conventions, le poids spécifique d'un corps est le quotient du poids P de ce corps *en grammes* par le nombre V qui exprime son volume *en centimètre cubes.* — Si maintenant, modifiant le choix de ces unités, on prenait pour unité de volume le *décimètre cube* et pour unité de poids le *kilogramme* (c'est-à-dire encore le poids de l'unité de volume d'eau à 4 degrés), et qu'on se proposât d'évaluer le poids spécifique du même corps en se servant de ces nouvelles unités, on voit que chacun des nombres représentés par P et V deviendrait mille fois plus petit, puisqu'il aurait été évalué au moyen d'une unité mille fois plus grande : le quotient ne serait donc pas changé, et par suite le poids spécifique serait encore représenté par le même nombre.

En général, on conviendra de prendre toujours l'unité de volume et l'unité de poids de manière qu'elles soient *correspondantes,* c'est-à-dire de manière que, l'unité de volume étant une fois déterminée, l'unité de poids soit le poids de l'unité de volume d'eau à 4 degrés, ce qui est toujours facile quand on emploie le système métrique : le quotient D sera un nombre constant, quel que soit le choix particulier d'unités qu'on ait fait. — C'est ce que nous supposerons toujours à l'avenir.

38. **La densité d'un corps peut aussi être définie le rapport du poids de ce corps au poids d'un égal volume d'eau.** — Lorsqu'on prend une unité de poids *correspondante* à l'unité de volume, par exemple pour unité de volume le centimètre cube, et pour unité de poids le gramme, le nombre V qui exprime le volume d'un corps en centimètres cubes est le même que le nombre p qui exprime en grammes le poids du même volume d'eau. Il en serait de même encore, si l'on prenait pour unité de volume le litre et pour unité de poids le kilogramme. — La formule (1) peut donc encore s'écrire sous la forme

$$(2) \qquad D = \frac{P}{p},$$

qui est la traduction de l'énoncé.

On fera usage indifféremment de l'une ou de l'autre de ces formules ; nous venons de voir d'ailleurs qu'elles ne diffèrent pas l'une de l'autre si les volumes et les poids sont exprimés en unités correspondantes.

39. **Usages des densités.** — 1° *Calculer le poids d'un corps, connaissant son volume et sa densité.* — La formule (1) donne immédiatement

$$P = V \times D.$$

On voit donc qu'il suffira d'effectuer le produit indiqué dans le second.

membre. — Il faut bien remarquer que, si le volume V est évalué en centimètres cubes, le nombre P fourni par le produit $V \times D$ exprimera des grammes. Si le volume V est évalué en décimètres cubes. le nombre P exprimera des kilogrammes, et ainsi de suite.

2° *Calculer le volume d'un corps, connaissant son poids et sa densité.* — La formule (1) donne

$$V = \frac{P}{D}.$$

Il suffira d'effectuer la division indiquée dans le second nombre. — Il est important de remarquer que, si le poids P est évalué en grammes, le nombre V fourni par le quotient $\frac{V}{D}$ exprimera des centimètres cubes. Si le poids P est évalué en kilogrammes. le nombre V exprimera des décimètres cubes ou des litres, et ainsi de suite.

DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES DENSITÉS DES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES.

40. **Méthode générale.** — Trois méthodes peuvent être employées pour déterminer, par l'expérience, les poids spécifiques des corps solides ou liquides; nous ne parlerons pas ici de la détermination des poids spécifiques des gaz, qui sera exposée dans un autre chapitre. — Le procédé général, commun à ces trois méthodes, consiste à évaluer 1° le poids P du corps; 2° le poids p du même volume d'eau; au moyen de ces données, la formule (2) donne la densité. — Les trois méthodes ne diffèrent entre elles que par les moyens employés pour obtenir P et p.

41. **Méthode du flacon.** — *Corps solides.* — Les flacons employés pour déterminer la densité des corps solides ont, le plus ordinairement. la forme représentée par la figure 31. Le bouchon $a\,b$ est formé d'un tube effilé, ouvert à sa partie supérieure; il est usé à l'émeri en b, de façon à s'enfoncer d'une quantité toujours égale dans le goulot. Lorsqu'on a rempli d'eau le petit flacon, et qu'on introduit le bouchon, il sort un peu de liquide par l'ouverture a, et la capacité intérieure est ainsi exactement pleine.



Fig. 31.

Soit à déterminer la densité d'un corps solide, insoluble dans l'eau, d'un morceau de soufre, par exemple. On place ce corps dans l'un des plateaux de la balance, et, à côté du corps, le flacon plein d'eau et bouché: on fait une tare dans l'autre plateau; puis on enlève le corps et on le remplace par des poids marqués, ce qui

donne son poids P par double pesée (13). — On retire alors les poids marqués; on introduit le corps dans le flacon, en sorte que, quand le bouchon est replacé, le corps a chassé du flacon un volume d'eau égal au sien; on essuye le flacon et on le replace dans le plateau. Pour rétablir l'équilibre on ajoute des poids marqués qui expriment le poids *p* de l'eau chassée par le corps. — On divise P par *p* et l'on obtient la densité du soufre.

Quand on opère sur des corps en poudre, ils retiennent toujours, après qu'on les a plongés dans l'eau, des bulles d'air qui se détachent difficilement : avant de replacer le flacon sur le plateau de la balance, il faut les mettre quelques instants dans le vide sous le récipient de la machine pneumatique.

La méthode du flacon est de beaucoup la meilleure que l'on puisse employer, elle est la seule qui fournisse, avec une égale précision, les deux poids P et *p*.

42. *Corps liquides.* — Le flacon précédent peut servir pour les liquides : cependant on emploie plus ordinairement de petits flacons formés d'un réservoir cylindrique A (*fig.* 32), surmonté d'un tube capillaire et d'une partie plus large B qui sert d'entonnoir. Pour emplir le flacon, on verse d'abord le liquide dans l'entonnoir, puis on chauffe le réservoir A pour en chasser l'air, et on laisse refroidir pour y faire pénétrer le liquide : en répétant deux ou trois fois cette opération, on emplit exactement le réservoir, et on enlève avec du papier buvard la petite quantité de liquide qui dépasse le trait *a* marqué sur le tube capillaire.

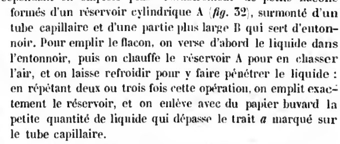


Fig. 32.

Soit à déterminer la densité de l'alcool, par exemple. On emplit le flacon d'alcool jusqu'au trait *a*, on le met dans l'un des plateaux de la balance, et on tare; on vide ensuite le flacon, on le sèche, on le replace sur le plateau, et les poids marqués qu'il faut ajouter pour rétablir l'équilibre donnent le poids P de l'alcool, avec l'exactitude de la double pesée (13). — On répète la même opération avec de l'eau, ce qui donne le poids *p* du même volume d'eau. — Le quotient de P par *p* donne la densité de l'alcool.

Cette méthode est aussi, pour les corps liquides, celle qui donne les résultats les plus précis, quand on opère avec une balance un peu sensible.

43. **Méthode de la balance hydrostatique.** — *Corps solides.* — Soit à déterminer la densité d'un corps solide, insoluble dans l'eau, d'un morceau de fonte par exemple. On le suspend, par un fil métallique fin, sous l'un des plateaux B d'une balance hydrostatique, et on fait une tare dans le plateau A (*fig.* 33); on enlève le corps, et on rétablit l'équilibre au moyen de poids marqués, placés en B : on connaît

ainsi le poids P du corps, par la méthode de la double pesée. On enlève les poids, on replace le corps sous le plateau, et on le descend dans l'eau : l'équilibre étant détruit, les poids marqués qu'il faut placer en B pour le rétablir expriment le poids p de l'eau déplacée. — Le quotient de P par p exprime la densité du corps.

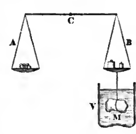


Fig. 33.

La résistance offerte, par le liquide, au mouvement du corps qui y est plongé, fait que cette méthode n'offre qu'une précision inférieure à la précédente.

44. *Corps liquides.* — La méthode de la balance hydrostatique peut s'appliquer aux corps liquides de la manière suivante : on suspend au plateau B une boule de verre contenant de la grenaille de plomb, et on fait une tare dans le plateau A. On plonge la boule dans le liquide dont on veut déterminer la densité, et les poids marqués qu'il faut ajouter en B pour rétablir l'équilibre donnent le poids P du liquide déplacé. On fait ensuite la même opération avec l'eau pure, ce qui donne le poids p du même volume d'eau. — Le quotient de P par p donne la densité du liquide.

45. **Méthode des aréomètres à volume constant.** — *Corps solides.* — On emploie, pour déterminer la densité des corps solides, l'aréomètre de Nicholson : il se compose d'un cylindre métallique creux A (*fig.* 34), terminé en haut et en bas par deux cônes; il porte à sa partie supérieure une tige avec un petit plateau B; à sa partie inférieure, une petite corbeille C lestée par de la grenaille de plomb.

Soit à déterminer la densité d'un corps solide, insoluble dans l'eau, d'un morceau de soufre, par exemple. L'appareil étant placé dans l'eau, on dépose le corps sur le plateau B et on ajoute de la grenaille de plomb, de façon que l'instrument s'enfonce jusqu'à un *trait d'affleurement a* marqué sur la tige ; on enlève le corps, on le remplace par des poids marqués de manière à rétablir l'affleurement, et on connaît ainsi le poids P du soufre. On retire ces poids, et on place le corps sur la corbeille inférieure C; il éprouve alors

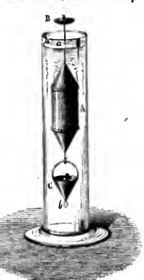


Fig. 34.
Aréomètre de Nicholson.

une poussée, en sorte que, pour établir de nouveau l'affleurement, on doit placer sur le plateau B des poids marqués; ils expriment le poids *p* de l'eau déplacée. — Le quotient de P par *p* donne la densité du soufre.

Pour appliquer cette méthode à des corps dont la densité est moindre que celle de l'eau, à des fragments de bois par exemple, on retourne la corbeille, et on l'accroche au cône inférieur par le petit anneau métallique *b*, de façon que le corps soit pressé contre elle par la poussée du liquide, et en ayant soin qu'il ne reste pas d'air sous la petite voûte formée par sa concavité.

Cette méthode a l'avantage de n'exiger qu'un instrument portatil, dispensant de l'emploi d'une balance. En revanche, elle est peu sensible, à cause de l'adhérence que l'eau offre toujours avec le métal.

46. *Corps liquides.* — On construit également pour déterminer la densité des liquides un instrument analogue, l'aréomètre de Fahrenheit, dont on fait assez rarement usage. Il est en verre (*fig.* 35), et lesté par du mercure placé dans une petite boule, à sa partie inférieure. — L'instrument a été pesé une fois pour toutes; soit 50 grammes son poids. On le plonge dans le liquide dont on veut déterminer la densité, et on ajoute des poids marqués sur le plateau supérieur, de manière à le faire enfoncer jusqu'au point d'affleurement : puisque l'instrument flotte, la poussée qu'il éprouve est égale à son poids total (34, *Remarque*), c'est-à-dire à la somme de 50 grammes et des poids placés sur le plateau; cette somme exprime donc le poids P d'un volume du liquide égal au volume de la partie plongée. De même, l'instrument étant plongé dans l'eau, la somme de 50 grammes et des poids qui déterminent l'affleurement est le poids *p* d'un égal volume d'eau. — Le quotient de P par *p* exprime la densité du liquide.

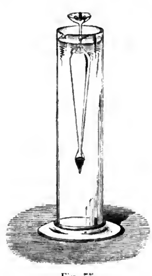


Fig. 35.
Aréomètre de Fahrenheit.

47. Corps solides solubles dans l'eau. — Pour déterminer la densité d'un corps solide soluble dans l'eau, aucune des méthodes précédentes n'étant applicable, on opère avec un autre liquide, dans lequel ce corps ne soit pas soluble : avec l'essence de térébenthine, par exemple. On obtient ainsi la densité du corps *par rapport à l'essence :* il suffit de multiplier ensuite ce nombre par la densité de l'essence par

rapport à l'eau. — Soient en effet P, p' et p les poids de volumes égaux du corps, d'essence et d'eau; la densité du corps par rapport à l'essence est $\frac{P}{p'}$; la densité de l'essence par rapport à l'eau est $\frac{p'}{p}$; et l'on voit que le produit $\frac{P}{p'} \times \frac{p'}{p}$ est égal à $\frac{P}{p}$, c'est-à-dire à la densité du corps.

POIDS SPÉCIFIQUES DE QUELQUES CORPS SOLIDES.

Aluminium	2,67	Ivoire	1,92
Argent fondu	10,47	Laiton	8,39
Bois d'orme	0,80	Liége	0,24
— de peuplier ordinaire	0,38	Marbre	2,84
— de sapin jaune	0,66	Or fondu	19,26
Cristal de roche	2,65	Platine fondu	21,15
Cuivre fondu	8,79	— écroui	23,00
— en fils	8,88	Porcelaine de Sèvres	2,24
Diamant	3,53	Potassium	0,86
Fer	7,79	Soufre natif ou octaédrique	2,03
Fonte de fer	7,21	— prismatique	1,97
Houille compacte	1,33	Verre de Saint-Gobain	2,49

POIDS SPÉCIFIQUES DE QUELQUES LIQUIDES

Acide nitrique	1,517	Essence de térébenthine	0,870
Acide sulfurique	1,841	Huile d'olive	0,915
Alcool absolu	0,806	Mercure	13,598
Eau de mer	1,026	Vin de Bordeaux	0,994
Eau distillée	1,000	— de Bourgogne	0,991

AÉROMÈTRES A POIDS CONSTANT.

48. **Aréomètres à poids constant, en général.** — Les aréomètres à poids constant sont de petits appareils flotteurs en verre, dont le poids a été réglé une fois pour toutes, et qui sont destinés à fournir des indications sur le degré de concentration des liquides employés dans le commerce, c'est-à-dire sur la proportion d'eau qui s'y trouve mélangée. — Il se composent tous (*fig.* 36, 37 et 38) d'un tube de verre, qui porte à sa partie inférieure un renflement de forme variable et une petite ampoule contenant du mercure ou de la grenaille de plomb, pour lester l'appareil et le faire tenir verticalement quand il flottera dans un liquide Il est évident qu'un même appareil placé dans des liquides différents, s'enfoncera de quantités variables. — Les aréomètres de diverses espèces diffèrent entre eux par leur graduation, dont nous allons indiquer rapidement les principes.

49. **Aréomètres de Baumé.** — Les aréomètres de Baumé se graduent de deux manières différentes, selon qu'ils sont destinés à des liquides plus denses que l'eau, ou à des liquides moins denses.

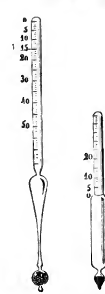


Fig. 36. Fig. 37.
Aréomètres de Baumé.

1° Pour graduer les aréomètres destinés à des liquides plus denses que l'eau (*pèse-acides, pèse-sirops, pèse-sels*), on les plonge dans l'eau pure et on règle le lest de manière qu'ils s'enfoncent à peu près jusqu'au sommet du tube : on marque zéro au point d'affleurement (*fig.* 36). On plonge ensuite l'instrument dans une solution de sel marin contenant 15 parties de sel pour 85 parties d'eau, et au nouveau point d'affleurement on marque 15. L'intervalle de ces deux points est partagé en 15 parties égales, qui sont les *degrés* de l'aréomètre, et l'on continue de marquer des degrés égaux jusqu'au bas du tube.

2° Pour graduer les aréomètres qui doivent servir à des liquides moins denses que l'eau (*pèse-esprits, pèse-liqueurs*), on règle le lest de manière que l'instrument, plongé dans une solution de 10 parties de sel marin pour 90 parties d'eau, s'enfonce seulement jusqu'à la naissance du tube, et on marque zéro au point d'affleurement (*fig.* 37). On le plonge ensuite dans l'eau pure, et le point d'affleurement est marqué 10. L'intervalle est partagé en dix parties égales, ou *degrés*, et la graduation est continuée jusqu'au sommet de la tige.

Ces graduations, purement conventionnelles et arbitraires, ne fournissent évidemment pas la densité d'un acide ou d'une liqueur par le degré que marque l'instrument flottant dans un de ces liquides. On sait seulement que l'acide sulfurique, à l'état de concentration nécessaire pour l'industrie, doit marquer 66 degrés au pèse-acides de Baumé; que l'éther doit marquer 56 degrés au pèse-esprits, etc. — On peut donc vérifier si le degré de concentration d'un liquide est convenable; mais, dans le cas où cette condition ne serait pas remplie, l'instrument n'indique même pas quelle est la proportion exacte d'eau mélangée.

50. **Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac.** — L'alcoomètre de Gay-Lussac est un aréomètre à volume constant, dont la graduation est faite pour donner immédiatement la richesse d'un mélange d'alcool et d'eau. Pour cela, on le gradue comme il suit, au moyen de mélanges faits dans des proportions connues. Le lest est réglé de façon que l'instrument, plongé dans l'alcool absolu, s'enfonce jusqu'au sommet de sa

tige, et, en ce point, on marque 100 (*fig.* 38). On fait ensuite une solution contenant *en volume* 95 d'alcool pour 100, et au point d'affleurement on marque 95. On continue à déterminer ainsi, par des expériences successives, les points 90, 85, etc. — Ces points étant assez rapprochés, on peut, sans erreur sensible, partager en cinq parties égales les espaces compris entre deux points consécutifs; mais on observe que ces divisions sont bien plus grandes au voisinage du sommet de la tige qu'à la partie inférieure: il est donc indispensable de déterminer par l'expérience un grand nombre de points suffisamment rapprochés. — Lorsque l'instrument ainsi construit marquera, par exemple, 67 dans un mélange d'alcool et d'eau, on pourra affirmer que ce mélange contient, en volume, 67 d'alcool pour 100.

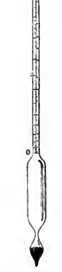


Fig. 38.
Alcoomètre de Gay-Lussac.

Toutefois, la graduation ayant été faite à la température de 15 degrés, si la température au moment d'un essai est notablement différente, le résultat doit subir une correction. C'est ce que permettent de faire immédiatement des tables construites par Gay-Lussac lui-même, pour la série des températures qui peuvent se présenter dans la pratique. — Enfin, pour que les indications de l'instrument aient une valeur, il est clair qu'il faut s'assurer si le mélange ne contient aucune substance autre que l'alcool et l'eau : si cette condition n'était pas remplie, il faudrait se débarrasser de ces substances étrangères, avant de faire usage de l'aréomètre.

CHAPITRE IV.

Pression atmosphérique. — Expériences qui la mettent en évidence. Baromètres de Fortin et de Gay-Lussac.

PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.

51. **L'air est un corps pesant.** — L'air et tous les gaz sont soumis à l'action de la pesanteur. Pour le démontrer, on prend un grand ballon de verre, muni d'un robinet, on le suspend sous l'un des plateaux de la balance, et on fait une tare dans l'autre plateau. Si l'on vient ensuite à enlever l'air de ce ballon, au moyen de la machine pneumatique, et à le replacer sous le plateau de la balance, on constate que l'équilibre n'existe plus : on peut le rétablir en mettant des poids marqués sur le plateau, et leur somme exprime alors le poids de l'air que contenait le ballon. — Cette expérience permet même de constater que le poids du litre d'air

est environ $1^{gr},3$; il suffit pour cela de déterminer la capacité du ballon, et de diviser le poids total de l'air enlevé, par le nombre de litres qui exprime cette capacité.

52. **Pression atmosphérique. – Expérience de Torricelli.** — L'air qui forme l'atmosphère terrestre étant pesant doit exercer, comme les liquides, en vertu de son poids, une pression sur les corps situés à la surface de la terre. — C'est à Torricelli qu'on doit la première démonstration expérimentale de ce fait.

Avant Torricelli, on admettait que, dans les pompes, quand le mouvement des pistons a progressivement chassé l'air des tuyaux, l'ascension de l'eau est due à ce que, la nature ayant *horreur du vide*, l'eau se précipite pour remplir le vide qui tendrait à se former. Mais les fontainiers de Florence n'ayant pu aspirer l'eau, au moyen de pompes, à une hauteur supérieure à 32 pieds (environ $10^m,4$), l'hypothèse que nous venons d'indiquer, outre qu'elle était au moins bizarre, devenait insuffisante. — Torricelli pensa que l'ascension de l'eau est due à la pression exercée par l'air atmosphérique sur la surface libre du liquide extérieur, pression qui ne peut être équilibrée que par celle d'une colonne liquide agissant sur les points qui sont situés à l'intérieur du tuyau, au même niveau horizontal.

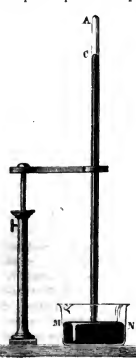


Fig. 39.

Pour le vérifier, Torricelli emplit de mercure un tube de verre, fermé à l'une de ses extrémités et long d'environ 1 mètre; bouchant ensuite avec le doigt l'extrémité ouverte, il renversa le tube, et plongea cette extrémité dans une cuvette contenant du mercure; en retirant alors le doigt, il vit la colonne de mercure abandonner le sommet du tube (*fig.* 39), mais conserver toujours une hauteur d'environ 76 centimètres au-dessus de la surface libre MN du liquide extérieur.

La hauteur de la colonne liquide qui est maintenue dans un tube semblable varie avec la nature du liquide. Pascal, en employant divers liquides pour répéter l'expérience de Torricelli, vérifia que les hauteurs sont inversement proportionnelles aux densités: un tube d'une quinzaine de mètres ayant été empli de vin rouge, la hauteur de la colonne qui resta soutenue dans le tube fut d'environ 32 pieds.

Enfin, Pascal pensa que, si c'est en effet la pression atmosphérique qui soutient le mercure dans l'expérience de Torricelli, la hauteur de la colonne soulevée doit être moindre au sommet d'une montagne que dans la vallée. L'expérience faite par son beau-frère Périer, au sommet du Puy-de-Dôme, et au même instant par d'autres expérimentateurs au pied de la montagne, donna un résultat absolument conforme à ces prévisions.

53. **Mesure de la pression exercée par l'atmosphère sur une surface déterminée, au moyen de l'expérience de Torricelli.** — Considérons deux surfaces égales, de 1 centimètre carré par exemple, situées au niveau de la surface libre dans la cuvette (*fig.* 40), l'une *ab* à l'intérieur du tube, l'autre *a'b'* à l'extérieur. La pression *p* que l'atmosphère exerce sur *a'b'* se transmet dans le liquide, en sorte que *ab* éprouve une pression de bas en haut, égale en grandeur à *p*; puisqu'il y a équilibre, cette pression est aussi égale à celle qu'exerce de haut en bas le mercure contenu dans le tube; elle peut donc être exprimée par le poids d'un cylindre de mercure ayant pour base *ab*, et pour hauteur la distance verticale de C à *ab*.



Fig. 40.

Dès lors, le calcul de la pression exercée par l'atmosphère sur une surface déterminée se réduit au calcul du poids d'une colonne cylindrique de mercure. — Si la hauteur du liquide dans le tube est exactement 76 centimètres, la pression sur un centimètre carré est exprimée par le poids d'un cylindre de mercure dont la base serait 1 centimètre carré, la hauteur 76 centimètres, par suite le volume 76 centimètres cubes; son poids exprimé en grammes est donc égal au produit de la densité du mercure 13,6 par 76, c'est-à-dire à 1033gr,6 ou à 1k,0336.

On voit que, sur un décimètre carré, la pression est de 103kil,36 : sur un mètre carré, de 10336 kilogrammes.

54. **Évaluation de la pression atmosphérique ou de la force élastique de l'air, par la hauteur d'une colonne de mercure.** — La pression atmosphérique varie, comme il a été dit, avec la distance à la surface de la terre; elle varie aussi, en un même lieu, aux diverses heures du jour. Au lieu d'estimer cette pression par sa valeur en kilogrammes sur une surface donnée, on la caractérise ordinairement par la hauteur de la colonne de mercure qui lui fait équilibre, et l'on dit par exemple que, en un lieu donné et à un instant donné, la *pression est de* 748 *millimètres :* c'est-à-dire que la pression exercée sur une surface déterminée est égale au poids d'une colonne de mercure ayant pour

base cette surface et pour hauteur 748 millimètres; la pression ains évaluée est immédiatement fournie par l'observation du tube de Torricelli.

Il est aisé de voir que l'évaluation de la pression atmosphérique fournit également celle de la force élastique de l'air dans le même lieu. En effet, si l'on isole par la pensée une petite masse d'air au milieu de l'atmosphère, comme la surface qui la limite est en équilibre, on voit que la pression exercée extérieurement sur cette surface par l'atmosphère est égale à la pression exercée intérieurement par la force élastique du gaz. On peut donc évaluer aussi la force élastique de l'air, en un lieu donné et à un moment donné, par la hauteur d'une colonne de mercure, et dire, en employant une locution abrégée semblable à la précédente, que *la force élastique de l'air*, à un moment donné, *est de 74 centimètres :* cette mesure de la force élastique sera encore fournie immédiatement par l'observation du tube de Torricelli.

La remarque précédente explique ce résultat, fourni par l'expérience, que la hauteur du mercure dans le tube de Torricelli ne change pas, lorsqu'on le place dans une chambre dont on ferme ensuite hermétiquement les communications avec l'extérieur : la pression qu'exerce l'air de la chambre, en vertu de sa force élastique, est demeurée égale à la pression de l'atmosphère avec laquelle cet air était d'abord en contact.

55. **Crève-vessie. — Hémisphères de Magdebourg.** — Un cylindre de verre, ouvert à ses deux extrémités, et sur l'ouverture supérieure duquel est tendue une membrane de vessie, est placée sur la platine de la machine pneumatique (*fig.* 41). Tant qu'on n'a pas raréfié l'air dans le cylindre, la vessie reste plane, parce qu'elle supporte sur ses deux faces des pressions égales; mais dès qu'on commence à raréfiér l'air intérieur, la pression due à la force élastique de cet air étant diminuée, la vessie se déprime sous la pression exercée par l'atmosphère, et bientôt elle se brise. Le bruit qui se produit alors est dû surtout au choc de l'air qui rentre, contre les parois intérieures du cylindre.

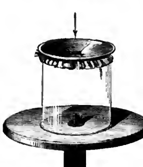


Fig. 41. — Crève-vessie.

Les *hémisphères de Magdebourg* (*fig.* 42) sont des hémisphères de laiton creux, dont les bords peuvent s'appliquer exactement l'un sur l'autre : une bande de cuir graissé rend la fermeture plus hermétique L'hémisphère inférieur porte une monture à robinet, qui peut se visser sur le conduit de la machine pneumatique. Les deux hémisphères étant superposés, si l'on fait le vide dans l'intérieur et qu'on ferme le robi-

net, la pression que l'atmosphère exerce perpendiculairement à chacun des éléments de la sphère, n'étant plus équilibrée par la force élastique de l'air intérieur, maintient ces hémisphères fortement appliqués l'un sur l'autre; deux personnes tirant en sens opposé ne peuvent plus les séparer. Des hémisphères plus gros, construits à Magdebourg, peu après l'invention de la machine pneumatique, par Otto de Guericke, résistèrent à la traction exercée par vingt chevaux, sans se séparer. — Si l'on vient, au contraire, à ouvrir le robinet, l'air rentre en sifflant dans la cavité des hémisphères, et il devient facile de les disjoindre.



Fig. 42.
Hémisphères de Magdebourg.

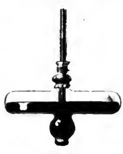
56. **Effet de la pression atmosphérique sur nos organes.** — Le corps humain ayant environ un mètre carré et demi de surface extérieure, on voit qu'il éprouve de la part de l'atmosphère une pression normale à ses différents points, dont la valeur totale dépasse quinze mille kilogrammes (53). Cette pression n'a cependant pas d'effet sensible sur nos organes. On s'explique ce résultat en remarquant que toutes les cavités de l'organisme sont remplies, ou de liquides qui sont incompressibles, ou d'air et de gaz dont la force élastique acquiert une valeur égale à la pression atmosphérique : la pression de l'atmosphère ne peut donc, ni tendre à diminuer le volume du corps, ni en gêner les mouvements. — Il se produit, au contraire, une gêne extrême quand elle vient à diminuer d'une manière notable, parce qu'il n'y a plus équilibre entre la force élastique du gaz intérieur et la pression extérieure. Ce dernier phénomène a été constaté par tous les aéronautes qui ont atteint des hauteurs un peu considérables.

BAROMÈTRES.

57. **Baromètres à cuvette.** — La hauteur du mercure dans le tube de Torricelli servant de mesure à la pression atmosphérique (54), cet instrument, construit avec les précautions qui en rendent les indications précises, peut être employé, soit pour obtenir la valeur absolue de cette pression, soit pour en évaluer les variations. — Les appareils diversement modifiés qui servent chaque jour à cet usage, ont reçu le nom de *baromètres* (βάρος, poids; μέτρον, mesure).

Le tube de Torricelli est le type des *baromètres à cuvette.* — Pour obte-

nir des indications exactes, il est nécessaire de chasser avec soin les bulles d'air ou les gouttelettes d'eau qui peuvent rester adhérentes aux parois du tube pendant qu'on l'emplit de mercure : le gaz ou la vapeur d'eau, se rendant à la partie supérieure dans l'espace AC (*fig.* 39), qui doit être parfaitement vide et qu'on appelle la *chambre barométrique*, déprimeraient la colonne liquide. On évite cet inconvénient en faisant bouillir progressivement le mercure dans toute la longueur du tube, avant de le retourner dans sa cuvette; une fois le tube installé, on reconnaîtra s'il a été parfaitement purgé d'air et d'humidité en l'inclinant un peu, jusqu'à ce que le mercure en atteigne le sommet : la chambre barométrique doit se remplir complétement, et le liquide doit venir frapper le verre en faisant *marteau* sur le fond du tube.


Fig. 43.

58. Baromètres à cuvette usuels. — Pour mesurer commodément la hauteur mercurielle, dans les baromètres usuels, on applique le tube et la cuvette sur une planchette qui porte une graduation en centimètres et millimètres, au moins dans la région que parcourt le sommet du mercure : le zéro de cette graduation est au niveau du liquide dans la cuvette. On suppose donc que ce niveau reste invariable, bien que, en réalité, quand le mercure monte dans le tube, il s'abaisse dans la cuvette, et inversement. Pour atténuer le plus possible cet effet, on emploie une cuvette dont la forme est représentée par la figure 43, et qui a l'avantage de donner au mercure une très-large surface, sans en employer cependant une masse trop considérable : les petites oscillations du liquide dans le tube ne produisent sur le niveau extérieur que des variations insensibles.

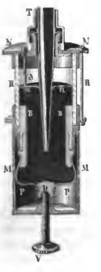


Fig. 44.

59. Baromètre de Fortin. — Le baromètre de Fortin est le seul baromètre à cuvette absolument précis. — La cuvette est formée d'un cylindre de verre R (*fig.* 44), qui est assujetti dans une monture métallique MN, garnie de bois à l'intérieur : le fond de la cuvette est formé par une peau de chamois PP; une vis métallique V, qui traverse la monture extérieure, supporte sur son extrémité un disque de bois D fixé à la peau de chamois, en sorte qu'on fait monter ou descendre le niveau du mercure dans la cuvette en tournant la vis dans un sens ou dans l'autre. Une petite

pointe d'ivoire *a*, fixée à la partie supérieure de la cuvette, indique le niveau auquel on doit amener la surface *mn* du mercure avant de commencer l'observation : pour arriver à ce résultat, on fait mouvoir la vis V, jusqu'à ce que la pointe *a* semble toucher exactement son image, vue par réflexion dans le mercure. — Sur le tube de laiton qui entoure le tube de verre T (*fig.* 45), est tracée une graduation dont le zéro correspond à l'extrémité de la pointe d'ivoire *a* : deux fentes longitudinales, opposées l'une à l'autre, permettent d'apercevoir le sommet de la colonne de mercure. — Enfin, pour lire la hauteur barométrique, on place le curseur C de façon que le plan horizontal passant par les bords supérieurs de deux petites fenêtres opposées soit tangent à la convexité du mercure : le numéro de la graduation corespondant à ce niveau est ainsi déterminé avec exactitude.



Fig. 45. — Baromètre de Fortin.

Pour installer l'instrument dans une position bien verticale, on peut le suspendre par l'anneau qui est à sa partie supérieure, et lui laisser prendre la position d'un fil à plomb. — Au lieu de cela, on peut encore l'assujettir sur un trépied, comme l'indique la figure 45 ; une *suspension de Cardan* lui

permet de se placer librement dans la position verticale, sous l'action du poids considérable de mercure que contient la cuvette.

Quand un baromètre doit être transporté, on a toujours à craindre que les mouvements ne fassent rentrer de l'air par la partie inférieure du tube jusque dans la chambre barométrique, ou que les chocs du mercure contre le sommet du tube ne viennent à le briser. — Pour transporter le baromètre de Fortin, on soulève le fond mobile de la cuvette à l'aide de la vis V, jusqu'à ce que le mercure remplisse complétement et la cuvette, et le tube : ainsi, les accidents que nous venons de signaler ne sont plus à craindre.

60. **Baromètres à siphon.** — Le baromètre à siphon consiste essentiellement en un tube recourbé ABD (*fig.* 46), dont la grande branche est fermée en A, et la petite branche ouverte en D. On a d'abord empli de mercure la grande branche, en inclinant le tube à diverses reprises pour en faire sortir successivement tout l'air qu'elle contenait, puis on a placé l'instrument dans une position verticale. A ce moment le mercure s'est abaissé dans la grande branche, et s'est élevé dans la petite : la distance verticale des deux niveaux *m* et C mesure la pression atmosphérique. — En effet, menons par le point *m* un plan horizontal *mn*. Le liquide compris en *m*B*n* au-dessous de ce plan, serait en équilibre s'il n'était sollicité que par la pesanteur ; donc les pressions exercées sur des surfaces égales en *m* et en *n*, d'un côté par l'atmosphère, et de l'autre par la colonne de mercure *n*C, se font équilibre. — Ordinairement, pour mesurer cette colonne, on place une échelle divisée en millimètres entre les deux branches : une graduation ascendante, partant d'un point O situé vers le milieu, donne la distance *h* de ce point au niveau supérieur C ; une graduation descendante, partant du même point O, donne la distance *h'* au niveau inférieur *m*. Il suffit évidemment de faire la somme $h + h'$ pour avoir la hauteur barométrique.

Fig. 46.

61. **Baromètre de Gay-Lussac.**— Le baromètre de Gay-Lussac est un baromètre à siphon, avec quelques modifications destinées surtout à en rendre le transport plus facile. La plus petite branche est fermée à sa partie supérieure en E (*fig.* 47), une ouverture capillaire, pratiquée en *o*, permet à la pression atmosphérique de se transmettre à la surface *m* du mercure. La courbure qui réunit les deux branches est formée par un tube capillaire D : cette disposition est destinée à empêcher l'air de pénétrer à travers la colonne mercurielle, quand on retourne l'instrument pour le transporter, ou qu'il est soumis en voyage à des secousses un peu violentes.

Afin d'éviter, d'une manière plus sûre encore, l'introduction de l'air dans la chambre barométrique, on a recours à un perfectionnement imaginé par Bunsen. On dispose, au milieu de la branche capillaire, un renflement dans lequel pénètre une pointe P (*fig.* 48) qui se continue avec la grande branche T. Si une petite bulle d'air, introduite par la petite branche E, tend à monter dans la chambre barométrique, elle passe à côté de la pointe et va se loger à la partie supérieure du renflement, où elle n'altère en rien les indications du baromètre.

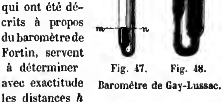


Fig. 47. Fig. 48.
Baromètre de Gay-Lussac.

L'instrument tout entier est enfermé dans une gaîne de laiton présentant des fentes longitudinales et opposées, par lesquelles on aperçoit les surfaces *m* et C du mercure : deux curseurs, semblables à ceux qui ont été décrits à propos du baromètre de Fortin, servent à déterminer avec exactitude les distances *h* et *h'* des deux niveaux au zéro commun des deux échelles.

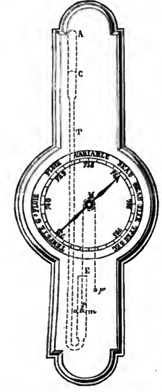


Fig. 49. — Baromètre à cadran.

62. **Baromètre à cadran.** — Le baromètre à cadran (*fig.* 49), employé comme baromètre d'appartement, est un baromètre à siphon, dont le mercure reçoit, sur la surface libre dans la petite branche, un petit poids *p* suspendu à un fil qui vient passer sur une poulie très-mobile M : un contrepoids *p'* maintient le fil tendu. Une aiguille, fixée à l'axe de la poulie, parcourt un cadran tracé sur la planche qui masque tout le reste de l'appareil. Sur le cadran on marque, en face des diverses positions de l'aiguille, les hauteurs correspondantes du mercure, exprimées en mil-

limètres; souvent aussi quelques indications relatives à l'état de l'atmosphère, dont on verra plus loin la signification

63. **Baromètre métallique de M. Bourdon.** — Le baromètre de M. Bourdon (*fig.* 50), employé également depuis quelques années comme baromètre d'appartement, repose sur des principes tout autres. Un tube métallique *amb*, à parois très-minces et ayant une section aplatie (dont la forme est représentée à part, à droite de la figure), est fixé en son milieu *m*, et articulé par ses deux extrémités *a* et *b* avec un levier très-mobile *e;* les mouvements de ce levier font mouvoir l'arc denté *gh*, et par suite l'aiguille *cd*, qui est supportée par une petite roue dentée (masquée sur la figure actuelle). Or, tout accroissement de la pression atmosphérique a pour effet de comprimer le tube, de l'aplatir, et de rapprocher ses extrémités *a* et *b;* alors, l'aiguille marche dans un certain sens. Lorsque la pression diminue, l'élasticité du tube ramène l'aiguille en sens contraire. — Cet instrument ne peut évidemment être gradué que par comparaison avec un baromètre à mercure.



Fig. 50.
Baromètre de M. Bourdon.

64. **Variations barométriques.** — La hauteur barométrique éprouve, dans un même lieu, des variations qui permettent souvent de préjuger, avec une certaine probabilité, l'approche des pluies ou du beau temps.

En France et dans les contrées de l'Europe qui en sont voisines, les vents humides et chauds qui viennent du sud-ouest font descendre le le baromètre: en même temps, ils amènent ordinairement la pluie, parce que la vapeur d'eau qu'ils transportent se condense en nous arrivant; un abaissement dans la colonne barométrique *coïncide* donc, d'ordinaire, avec l'approche des pluies. — Au contraire, les vents secs et froids du nord-est amènent presque toujours le beau temps.

De là l'usage adopté, d'inscrire sur les baromètres d'appartements, en regard des chiffres qui indiquent les hauteurs de la colonne mercurielle,

des indications relatives à l'état du ciel. — A la hauteur 758 millimètres, qui est une hauteur moyenne dans nos contrées, correspond l'indication *variable;* les autres indications se succèdent de part et d'autre, comme il suit, de 9 en 9 millimètres :

785 millimètres.	*Très-sec.*
776 »	*Beau fixe.*
767 »	*Beau temps.*
758 »	*Variable.*
749 »	*Pluie ou vent.*
740 »	*Grande pluie.*
731 »	*Tempête.*

Il va sans dire que ces indications n'ont aucun caractère de certitude absolue. — Elles peuvent d'ailleurs n'être applicables en aucune façon à des contrées dont la position géographique différerait beaucoup de la nôtre.

CHAPITRE V.

Loi de Mariotte. — Manomètres — Machine pneumatique, — Pompes et siphons. Influence du poids de l'air sur le poids des corps qui y sont plongés. — Aérostats.

LOI DE MARIOTTE. — MANOMÈTRES.

65. **Loi de Mariotte.** — *A une même température, les volumes d'une même masse de gaz sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte.* — Cette loi a été énoncée simultanément, vers 1670, en France par l'abbé Mariotte, et en Angleterre par Boyle; on peut la vérifier pour l'air, à l'aide des expériences suivantes:

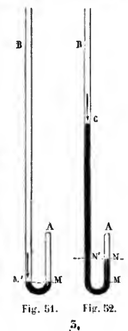


Fig. 51. Fig. 52.

1° Le *tube de Mariotte* (*fig.* 51) est un tube de verre formé de deux branches très-inégales, la plus grande B ouverte, la plus petite A fermée On verse du mercure dans le tube, et l'on fait en sorte que les surfaces du mercure M et M' dans les deux branches soient sur un même plan horizontal; c'est ce à quoi on parvient toujours, après quelques tâtonnements, en inclinant légèrement le tube, de manière à laisser sortir un peu de l'air qu'on a ainsi enfermé dans la petite branche. Lorsque ce résultat est obtenu, le volume de l'air AM est mesuré par une graduation marquée sur la planche qui soutient le tube; quant à la force élastique, elle est égale à la pression atmosphérique qui

s'exerce sur le même plan horizontal en M'. — On ajoute alors du mercure par la branche ouverte, jusqu'à ce qu'on ait réduit *à moitié* le volume de l'air; soient alors N et C (*fig.* 52) les surfaces du mercure. Si la loi de Mariotte est exacte, la force élastique de cet air doit être *double* de la pression atmosphérique : or, cette force élastique est égale à la pression exercée en N' sur le même plan horizontal, c'est-à-dire à la pression de la colonne de mercure N'C augmentée de la pression atmosphérique; donc N'C doit être égale à la hauteur barométrique, c'est-à-dire à 76 centimètres environ ; c'est en effet ce qu'on vérifie immédiatement au moyen de la graduation marquée le long du tube B. — Si maintenant le tube est assez long pour qu'on puisse, en versant encore du mercure, réduire le volume *au tiers* du volume initial AM, on constatera que la force élastique sera devenue *triple* de la pression atmosphérique, c'est-à-dire que la hauteur du mercure en B au-dessus de la surface dans la branche A sera égale à deux fois la hauteur barométrique, ou à environ deux fois 76 centimètres. — Ainsi de suite pour des volumes plus petits et des pressions plus grandes.

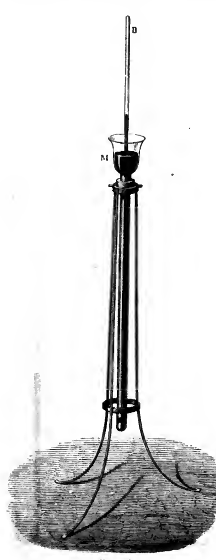


Fig. 53.

2° Mariotte a indiqué un moyen de vérifier encore la loi, en enfermant de l'air sous la pression atmosphérique et augmentant son volume. On prend un tube de verre cylindrique B (*fig.* 53)

semblable à un tube de baromètre, et, au lieu de l'emplir complétement de mercure, on laisse un certain espace plein d'air : on bouche l'extrémité ouverte avec le doigt, et on la plonge dans une *cuvette profonde* à mercure M, formée d'une cuvette de verre fixée à la partie supérieure d'un tube de fer vertical. On enfonce d'abord le tube (*fig.* 54) de manière que les surfaces du mercure dans ce tube et dans la cuvette soient sur un même plan horizontal ; à ce moment, la force élastique de l'air contenu en AM est égale à la pression atmosphérique. — On soulève alors le tube, jusqu'à ce que le volume occupé par l'air devienne *double* de ce qu'il était : on voit en même temps le mercure s'élever dans le tube. Or, si la loi de Mariotte est exacte, la force élastique de cet air doit être égale à *la moitié* de la pression atmosphérique : mais cette force élastique, ajoutée à la pression de la colonne de mercure soulevée, doit exercer au niveau du mercure extérieur une pression égale à la pression atmosphérique : donc la colonne soulevée doit être égale à la moitié de 76 centimètres environ, ou à 38 centimètres ; c'est ce qu'on vérifie en mesurant cette colonne. — On soulève encore le tube jusqu'à ce que le volume de l'air devienne *triple* du volume initial AM ; si la loi de Mariotte est exacte, sa force élastique doit être *le tiers* de la pression atmosphérique : cette force élastique, ajoutée à la pression de la colonne soulevée, devant produire au niveau du mercure extérieur une pression égale à la pression atmosphérique, la colonne soulevée doit avoir environ les deux tiers de 76 centimètres, c'est-à-dire 50^c,7 ; c'est ce qu'on vérifie encore en mesurant cette colonne. — Ainsi de suite pour des volumes plus grands et des forces élastiques moindres.



Fig. 54.

66. **Résultats de recherches plus précises sur la loi de Mariotte.** — Les expériences précédentes ne permettent de vérifier la loi de Mariotte que dans des limites peu étendues, et avec très-peu de précision. — Les expériences de Dulong et Arago ont eu pour résultat d'établir que la loi de Mariotte doit être admise comme sensiblement exacte, pour l'air, jusqu'à des pressions atteignant 27 atmosphères.

Des expériences faites à peu près simultanément par Œrstedt et par Despretz montrèrent que les gaz *facilement liquéfiables* se comportent autrement que l'air quand on les soumet à des pressions un peu considérables. — Enfin, des expériences de M. Regnault, il résulte que la plupart des gaz, quand on les soumet à des pressions très-grandes, éprouvent une diminution de volume plus considérable que ne l'indiquerait la loi de Mariotte : toutefois, c'est seulement pour les gaz liquéfiables, comme l'acide carbonique, que la différence est assez considérable ; c'est pour ces gaz seulement qu'il devient impossible d'admettre complète-

ment la loi de Mariotte, quand on les soumet à de fortes pressions. — Une singularité inexpliquée jusqu'ici, c'est que l'hydrogène seul s'écarte de la loi de Mariotte en sens inverse : c'est-à-dire que, pour des pressions un peu grandes, il éprouve une diminution de volume moindre que ne l'indiquerait la loi de Mariotte.

67. **Problèmes généraux relatifs à la loi de Mariotte.** — Les écarts que présentent certains gaz par rapport à la loi de Mariotte étant toujours, en définitive, assez faibles pour les changements de pression qu'on a le plus souvent à considérer, nous admettrons cette loi comme absolument exacte.

Dès lors, on résout immédiatement les deux problèmes suivants :

1° *Connaissant le volume* V *d'une masse de gaz sous une pression* P, *trouver son volume* V′ *sous une autre pression* P′, *la température restant constante.* — L'énoncé même de la loi de Mariotte donne

$$V' = V\,\frac{P}{P'}.$$

2° *Connaissant la force élastique* P *d'une masse de gaz dont le volume est* V, *trouver la force élastique* P′ *qu'elle doit acquérir si son volume devient* V′, *sa température restant constante.* — La loi de Mariotte donne

$$P' = P \cdot \frac{V}{V'}.$$

Ces deux problèmes se rencontreront fréquemment dans la suite.

68. **Problèmes sur les mélanges de gaz.** — Deux ou plusieurs masses gazeuses, lorsqu'elles ne sont séparées par aucune paroi solide, tendent toujours à se mélanger intimement : si l'on analyse, après un temps suffisant, des parties du mélange prises en divers points de la masse totale, on constate qu'elles contiennent chacune tous les gaz mis en présence, et dans les mêmes proportions. — Les divers problèmes que l'on pourra se proposer sur ces mélanges gazeux reviennent, en général, aux deux suivants :

1° *Connaissant les volumes* $v, v', v'', \ldots$ *de plusieurs gaz, sous les pressions* $p, p', p'', \ldots$, *et le volume* V *que l'on fait occuper au mélange, trouver la force élastique* P *de ce mélange.*

Ce problème se résout immédiatement à l'aide de la loi de Mariotte, et de la *loi du mélange des gaz* dont l'énoncé est dû à Dalton : *La force élastique d'un mélange gazeux est égale à la somme des forces élastiques de tous les gaz, considérés chacun comme occupant le volume total du mélange.* — On voit que, si le premier gaz occupait seul le volume V, sa force élastique serait $p\,\frac{v}{V}$; de même, les forces élastiques de chacun des autres gaz, sous le volume V, seraient respectivement $p'\,\frac{v'}{V}$,

$p'' \frac{v''}{V}$, ... Donc, d'après la loi de Dalton, la force élastique du mélange sera

$$P = p\frac{v}{V} + p'\frac{v'}{V} + p''\frac{v''}{V} + \dots \quad (1)$$

2° *Connaissant les volumes v, v', v'', ..., correspondants aux pressions p, p', p'',..., et la pression* P *du mélange, trouver son volume* V. En posant l'équation (1) comme précédemment, et la résolvant par rapport à l'inconnue actuelle V, il vient

$$V = \frac{pv + p'v' + p''v'' + \dots}{P},$$

équation qui fournit la solution du problème. — Remarquons qu'elle pourrait s'écrire encore :

$$V = v\frac{p}{P} + v'\frac{p'}{P} + v''\frac{p''}{P} + \dots,$$

ce qui fournirait cet autre énoncé de la loi de Dalton : *le volume d'un mélange gazeux est égal à la somme des volumes de tous les gaz considérés comme soumis chacun à la pression totale du mélange.* — Ce second énoncé donne immédiatement la solution de ce second problème.

MANOMÈTRES.

69. **Manomètres en général.** — On appelle *manomètres* des instruments destinés à mesurer les forces élastiques des gaz ou des vapeurs. Ils sont surtout employés dans l'industrie, pour déterminer la force élastique de la vapeur dans les chaudières.

70. **Manomètre à air libre.** — Un tube MN (*fig.* 55), ouvert à ses extrémités, plonge dans un petit vase métallique A contenant du mercure; ce vase est contenu dans un cylindre métallique B, à la partie supérieure duquel le tube est mastiqué solidement en C. La vapeur, arrivant dans le cylindre par le robinet R, presse sur la surface du mercure et peut faire monter le liquide dans le tube. Pour graduer l'appareil, on suppose en général que le niveau du mercure reste invariable dans le vase A. — Cela posé, on voit que, si la pression de la vapeur est égale à la pression atmosphérique, le niveau dans le tube est sur le même plan horizontal que dans le vase A. Si la pression de la



Fig. 55.
Manomètre à air libre.

vapeur devient de 2 atmosphères, le mercure monte de 76 centimètres dans le tube; si la pression devient de 3 atmosphères, la hauteur du mercure est de 2 fois 76 centimétres, et ainsi de suite. — Lorsque le manomètre doit marquer des pressions qui ne dépassent pas 3 ou 4 atmosphères, on prend un tube de verre, et l'on marque 2, 3, 4 atmosphères sur la planche qui supporte ce tube, à des distances de la surface extérieure du mercure égales à 1, 2, 3 fois 76 centimètres. Ces intervalles peuvent être ensuite subdivisés pour indiquer les fractions d'atmosphère.

Quand la pression doit dépasser 4 à 5 atmosphères, il est rare qu'on fasse usage des manomètres à air libre. Toutefois, la disposition précédente peut encore être employée, à la condition de remplacer le tube de verre par un tube de fer : pour évaluer la position du sommet du mercure dans ce tube, on place alors à la surface un petit poids supporté par un fil, qui passe sur une poulie et qui est tendu par un contre-poids extérieur au tube. Quand le mercure monte ou descend, le contre-poids se meut en sens inverse le long d'une échelle tracée sur la planche.

Ces manomètres ont l'avantage d'offrir une sensibilité assez grande, et qui demeure la même aux divers points de leur échelle. — Ils ont l'inconvénient de présenter une très-grande longueur, quand ils doivent mesurer des pressions un peu considérables, et d'exiger une quantité de mercure qui en rend le prix élevé. Aussi tendent-ils à disparaître des usages industriels.



Fig. 56.
Manomètre à air comprimé.

71. **Manomètre à air comprimé.** — Nous décrirons ici un manomètre à air comprimé, qui diffère du manomètre à air libre précédent en ce que le tube est fermé en M, à sa partie supérieure (*fig.* 56). L'air contenu dans ce tube est comprimé quand le mercure s'élève, en sorte que, pour évaluer la pression exercée par la vapeur sur le mercure extérieur au tube, il faut ajouter à la force élastique de cet air, qui varie en raison inverse de son volume, la pression de la colonne de mercure. On voit donc que le point où l'on doit marquer 2 atmosphères se trouve un peu plus bas que la moitié du tube; le point où l'on doit marquer 3 atmosphères est un peu plus bas que le tiers; et ainsi des pressions suivantes. — Ces points peuvent d'ailleurs être déterminés d'une manière précise, soit par le calcul, soit par comparaison avec un autre manomètre.

Ces manomètres ont l'avantage d'être plus transportables que les précédents, et de contenir moins de mercure. — Ils offrent cet inconvénient

que les divisions correspondantes à des pressions un peu grandes, comme 12 ou 15 atmosphères, sont très-rapprochées les unes des autres. La plus petite erreur, commise dans l'évaluation du niveau du mercure, conduit alors à une erreur très-grande dans l'évaluation des pressions : c'est ce qu'on n'avait pas à craindre dans les manomètres à air libre.

72. **Manomètre métallique de M. Bourdon.** — Un tube enroulé en spirale et dont la section est semblable à celle qui est indiquée à droite de la figure 50, communique avec la chaudière par l'une de ses extrémités qui est fixe (*fig.* 58); quand la pression de la vapeur augmente, la spirale tend à s'ouvrir, et l'extrémité libre du tube entraîne une aiguille qui se meut sur un cadran (*fig.* 57).— Pour graduer ces appareils, on les met en communication avec un espace où l'on comprime de l'air, et l'on détermine les valeurs successives de la pression avec un manomètre déjà construit : on obtient ainsi les principaux points de repère qui permettent d'indiquer, sur le cadran, les pressions évaluées en atmosphères.

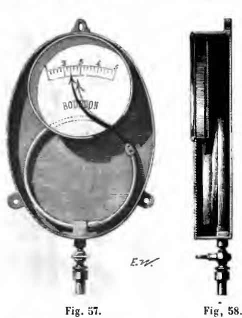


Fig. 57. Fig. 58.
Manomètre de M. Bourdon.

Ce manomètre métallique, et quelques autres dont le jeu repose également sur l'élasticité des métaux, ont l'avantage d'être à la fois très-peu fragiles, très-portatifs et peu coûteux ; aussi tend-on à les substituer presque partout aux manomètres à liquides.

MACHINE PNEUMATIQUE.

73. **Description.** — La *machine pneumatique* est destinée à enlever l'air d'un espace limité : elle est d'autant plus parfaite qu'elle rend plus petite la force élastique de l'air restant, c'est-à-dire qu'elle approche davantage du vide absolu. — La première réalisation d'un appareil destiné à cet usage est due à Otto de Guericke, bourgmestre à Magdebourg : de

puis cette époque, les constructeurs ou les physiciens ont fait subir, à l'appareil qu'il avait imaginé, un nombre considérable de modifications. — Nous décrirons la machine pneumatique telle qu'on la trouve aujourd'hui dans la plupart des cabinets de physique.

La partie essentielle de la machine pneumatique est un système de deux corps de pompe cylindriques C, C' (*fig.* 59), contenant chacun un

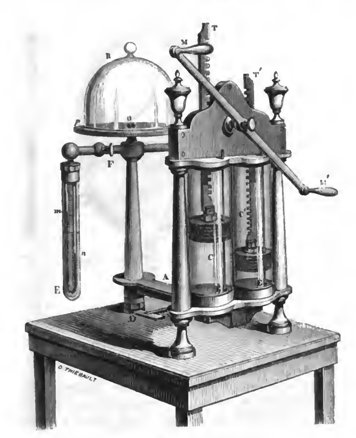


Fig. 59. — Machine pneumatique.

piston, et communiquant par leur partie inférieure avec un seul et même conduit en fonte, situé au-dessous de la plaque A : ce conduit vient s'ouvrir en O au centre d'un plateau *p* ou *platine ;* la platine est formée d'un disque de cristal usé à l'émeri, de façon que sa face supérieure soit bien plane. Sur ce disque, on pourra appliquer les cloches sous lesquelles on se propose de faire le vide, après avoir eu soin d'en enduire les bords de

suif, afin qu'il ne reste pas d'interstices entre eux et la platine. Un pas de vis, pratiqué à l'extrémité O du conduit, permet également d'y adapter les appareils dont on veut enlever l'air, ainsi que nous avons eu déjà occasion de l'indiquer. — Nous appellerons en général *récipient* l'espace de forme quelconque, dans lequel la machine devra raréfier l'air.

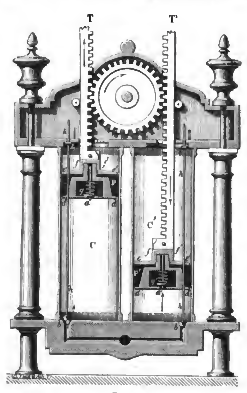


Fig. 60.
Coupe verticale des corps de pompe et des pistons.

La figure 60 représente une section des deux corps de pompe, par un plan vertical mené suivant leurs axes : il nous suffira de décrire l'un d'eux. — Le piston est formé de rondelles de cuir circulaires, pressées entre deux plaques métalliques *dd'*, *ee'*, qu'on peut serrer l'une contre l'autre pour forcer le cuir à s'appliquer sur la paroi intérieure du corps de pompe. La pièce métallique qui forme le noyau du piston est creusée, suivant l'axe, d'un canal qui la traverse entièrement ; ce canal contient un petit disque de métal *g*, qui est maintenu faiblement appliqué sur les bords de l'ouverture *a* par un ressort à boudin. Le piston est tra-

versé par une tige métallique *hh*, qui y passe à frottement dur, c'est-à-dire de façon qu'il tende toujours à entraîner la tige dans ses mouvements, mais qu'il puisse cependant glisser sur elle quand elle viendra buter par une de ses extrémités sur un point fixe; cette tige porte à sa partie inférieure un bouchon conique qui peut s'engager exactement dans l'entrée *b* du conduit, et à sa partie supérieure un arrêt *i*, qui viendra buter contre la base supérieure du corps de pompe dès que le piston, en s'élevant, aura entraîné le bouchon conique à une petite distance au-dessus de l'ouverture *b*. — Des tiges à crémaillère T, T', articulées avec les pistons, engrènent avec une même roue dentée qu'on mettra en mouvement alternativement dans un sens et dans l'autre à l'aide de la manivelle MM' (*fig.* 59) : dans chacun de ces mouvements, l'un des pistons s'abaissera pendant que l'autre sera soulevé, et réciproquement.

Pour concevoir l'effet produit par les mouvements de l'un des pistons, supposons que ce piston, d'abord appliqué sur le fond du corps de pompe, vienne à être soulevé. La tige métallique *h* étant d'abord entraînée dans ce mouvement, le bouchon conique est élevé un peu au-dessus de l'ouverture; mais bientôt, la tige venant buter par son arrêt *i* contre la base supérieure du corps de pompe, le piston continue seul de monter. Pendant ce mouvement, l'air contenu dans le récipient se répand dans le corps de pompe, en sorte que sa force élastique va en décroissant; le disque *g* reste donc appliqué sur l'ouverture *a*, par la pression atmosphérique qui s'exerce sur sa face supérieure. — Le piston étant arrivé en haut de sa course, considérons ce qui se passe lorsqu'il vient à descendre. La tige *h* étant immédiatement entraînée, le bouchon conique viendra fermer l'ouverture *b*; l'air enfermé dans le corps de pompe acquierra une force élastique croissante, et il soulèvera la soupape *g* quand sa force élastique sera devenue supérieure à la pression atmosphérique. Si le piston vient s'appliquer sur le fond du cylindre, l'air enfermé dans le corps de pompe sera complétement expulsé. — Les mêmes phénomènes se reproduiront aux coups de piston suivants.

L'emploi de deux corps de pompe, au lieu d'un seul, a l'avantage de rendre l'opération à la fois plus rapide et moins pénible. Elle est plus rapide, puisque les deux pistons fonctionnent à la fois, et de la même manière. Elle est moins pénible, parce que les pressions que l'atmosphère exerce sur les faces supérieures des deux pistons se font équilibre : l'effort que l'on doit faire résulte donc seulement de la différence des forces élastiques de l'air dans les deux corps de pompe, et aussi des frottements qui se produisent entre les deux pistons et les surfaces intérieures des cylindres.

Un robinet, qu'on nomme la *clef* de la machine, et qu'on voit en D dans la figure 59, permet d'interrompre la communication entre les corps

de pompe et le récipient. Ce robinet contient, outre sa voie ordinaire, un petit canal longitudinal qui en est indépendant et qui se recourbe de manière à venir déboucher, quand le robinet est fermé, soit dans la partie du conduit qui est du côté des corps de pompe (*fig.* 61), soit dans celle qui se rend au récipient (*fig.* 62). En enlevant la cheville K qui bouche l'extrémité *m* du petit canal, on laisse ainsi rentrer l'air, soit dans les corps de pompe, soit dans le récipient : des lettres gravées extérieurement sur la clef elle-même indiquent à l'opérateur ces deux positions. Il suffit ensuite de tourner d'un quart de circonférence pour *ouvrir* la clef, et faire communiquer les deux parties du conduit au moyen de la voie V.

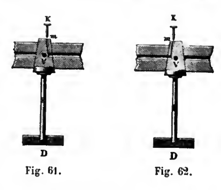


Fig. 61. Fig. 62.

74. Calcul de la force élastique de l'air restant, après un nombre déterminé de coups de piston. — Désignons par V le volume du récipient et des conduits, par v le volume du corps de pompe, par H la force élastique de l'air avant l'opération : cette force élastique est, en général, égale à la pression atmosphérique. Quand on soulève pour la première fois le piston, l'air du récipient, qui occupait le volume V sous la pression H, acquiert le volume $V+v$; si donc on désigne par h_1 sa force élastique, on aura, d'après la loi de Mariotte :

$$\frac{h_1}{H}=\frac{V}{V+v}, \qquad \text{d'où} \qquad h_1=H\frac{V}{V+v};$$

ce qui montre que, pour obtenir la force élastique après le premier coup de piston, il suffit de multiplier la force élastique que possédait l'air avant ce coup de piston par la fraction $\frac{V}{V+v}$. De même, pour obtenir la pression après le second coup de piston, il suffira de multiplier l'expression précédente par $\frac{V}{V+v}$, ce qui donnera $H\left(\frac{V}{V+v}\right)^2$, et ainsi de suite. Donc si h_n désigne la force élastique de l'air restant après n coups de piston, on aura :

$$h_n=H\left(\frac{V}{V+v}\right)^n.$$

Les valeurs de h_n vont en décroissant indéfiniment à mesure que n augmente, puisque la quantité entre parenthèses est plus petite que l'unité. On voit donc que, en attribuant à la machine une perfection théorique,

il y aurait toujours avantage à donner un nombre de coups de piston de plus en plus considérable : la force élastique pourrait atteindre une valeur aussi petite qu'on voudrait, sans devenir jamais rigoureusement nulle.

75. **Influence des causes qui limitent l'effet de la machine.** — Quelque soin qu'on ait apporté à la construction d'une machine pneumatique, il reste toujours sous les pistons, quand ils sont au bas de leur course, de petites cavités où peut se loger l'air : c'est ce qu'on nomme l'*espace nuisible*. Or il est aisé de voir que si, en faisant fonctionner la machine, on atteint une force élastique f telle, que l'air répandu dans le corps de pompe puisse être réduit au volume de l'espace nuisible sans acquérir une force élastique supérieure à la pression atmosphérique H, la soupape intérieure du piston cessera de se soulever et l'air cessera de s'échapper au dehors : il n'y aura donc, à partir de ce moment, aucun avantage à faire fonctionner plus longtemps la machine. — Quant à la valeur de la force élastique limite f, on aura, en désignant par u le volume de l'espace nuisible :

$$\frac{f}{H} = \frac{u}{v}, \qquad \text{d'où} \qquad f = H \cdot \frac{u}{v}.$$

En outre, au bout de quelque temps de service, il s'établit, entre les diverses pièces de la machine, des fuites par lesquelles l'air extérieur tend à rentrer. La limite de raréfaction est alors beaucoup moins reculée; et elle est atteinte dès que la quantité d'air qui rentre, pendant un temps déterminé, est égale à celle que la machine expulse pendant le même temps.

76. **Manomètre de la machine pneumatique.** — La figure 59 montre, sur le côté de la machine, une éprouvette de verre E, mastiquée dans une monture métallique qui la fait communiquer avec les conduits. Dans cette éprouvette est un petit manomètre à mercure, destiné à faire connaître la force élastique de l'air qui reste dans le récipient. Il se compose d'un tube de verre en forme d'U, dont l'une des branches n est ouverte et l'autre m fermée : on l'a rempli de mercure comme un baromètre à siphon (60); mais, les branches n'ayant guère qu'une longueur de 20 centimètres, quand la pression de l'atmosphère s'exerce dans la branche ouverte, le liquide reste appliqué contre l'extrémité de la branche fermée; de là le nom de *baromètre tronqué* qu'on donne souvent à cet appareil. — Lorsque la force élastique de l'air dans la machine est devenue suffisamment faible, le mercure s'abaisse dans la branche fermée et monte dans la branche ouverte; la hauteur du mercure comprise entre les deux niveaux mesure à chaque instant la pression de l'air restant (60).

POMPES. — SIPHON.

77. **Des diverses espèces de pompes à liquides.** — Les pompes sont des machines dont on fait fréquemment usage pour élever l'eau, à l'aide d'une force employée à faire mouvoir un piston. — L'étude détaillée des pompes, et en particulier des rapports qui doivent exister entre la force motrice et la grandeur de l'effet à produire, appartient plus particulièrement à la *mécanique :* nous nous bornerons ici à indiquer les principes de physique qui trouvent leur application dans le jeu des pompes, renvoyant l'élève, pour les autres détails, à la partie de cet ouvrage qui traite de la mécanique proprement dite.

Nous rapporterons les pompes à trois types principaux : 1° la *pompe aspirante;* 2° la *pompe foulante;* 3° la *pompe aspirante et foulante.*

78. **Pompe aspirante.** — La pompe aspirante (*fig.* 63) se compose d'un *tuyau d'aspiration* T, d'un *corps de pompe* CC′ dans lequel se meut un piston P, et d'un *tuyau de déversement* D. A la jonction du tuyau d'aspiration et du corps de pompe est placée une soupape, qui peut se soulever pour permettre le passage de l'air ou des liquides de bas en haut, mais qui ne peut s'abaisser au-dessous du plan horizontal de jonction ; c'est en général un *clapet* comme celui qu'on a figuré en S, c'est-à-dire une petite plaque métallique mobile autour d'une charnière. Le piston est un cylindre garni, sur son contour, d'étoupes serrées qui s'appliquent exactement sur la surface interne du corps de pompe : il est traversé par une ou deux ouvertures parallèles à son axe, et garnies elles-mêmes de clapets *s*, *s′*.

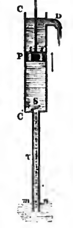


Fig. 63. Pompe aspirante.

La partie inférieure du tuyau d'aspiration étant supposée plongée dans un puisard où l'eau arrive en *mn*, et la pompe n'ayant pas encore fonctionné, supposons qu'on soulève le piston. Comme il tend à faire le vide au-dessous de lui, les soupapes *s*, *s′* restent fermées par la pression atmosphérique extérieure, et au contraire la soupape S se soulève, pour laisser passer au-dessus d'elle une partie de l'air qui était dans le tuyau d'aspiration ; la force élastique de cet air devenant moindre, l'eau du puisard s'élève dans le tuyau T, jusqu'à ce que la pression qu'elle exerce au niveau de *mn*, augmentée de celle de l'air intérieur, donne une pression totale égale à la pression atmosphérique qui s'exerce à l'extérieur. Supposons que l'eau n'atteigne pas encore le point S quand le piston est au haut de sa course : la soupape S retombe par son propre poids, et, quand le piston descend, il comprime l'air con-

tenu dans le corps de pompe; il lui fait bientôt acquérir une force élastique suffisante pour que les soupapes *s* et *s'* se soulèvent, et laissent échapper cet air à l'extérieur. Quand le piston remonte, l'eau s'élève un peu plus encore dans le tuyau d'aspiration, et ainsi de suite, jusqu'au moment où l'on franchit la soupape S, et la pompe est ***amorcée***. Ce résultat pourra toujours être obtenu, à la condition que le tuyau d'aspiration n'ait pas une hauteur supérieure à 10 mètres environ, au-dessus du niveau *mn*[1]. — La pompe une fois amorcée, si l'on continue à faire fonctionner le piston, chaque fois qu'il descend, l'eau enfermée dans le corps de pompe franchit les soupapes *s*, *s'*; chaque fois qu'il remonte, il élève toute l'eau que supporte sa face supérieure, et la fait couler par le tuyau de déversement D. Ces mouvements font en même temps arriver successivement l'eau du puisard dans le tuyau d'aspiration et dans le corps de pompe, en sorte que l'appareil est toujours entièrement rempli jusqu'au niveau de l'orifice de déversement D.



Fig. 64. Pompe aspirante et élévatoire.

En modifiant un peu cette pompe, on peut la rendre capable d'élever l'eau à une assez grande hauteur au-dessus du corps de pompe. Il suffit pour cela d'adapter, à la place du tuyau de déversement D, un tuyau d'ascension E (*fig.* 64), et de fermer la partie supérieure du corps de pompe, en faisant passer la tige du piston au travers d'une garniture d'étoupes. Chaque fois que le piston monte, il soulève dans le tuyau d'ascension E l'eau qui est au-dessus de lui, quand il descend, la soupape S se ferme, et le liquide traverse les soupapes *s*, *s'*, sans que son niveau change dans le tuyau E. — Cette pompe prend alors le nom d'***aspirante et élévatoire***.

Les pompes destinées aux usages domestiques sont souvent disposées de façon qu'une même pompe peut servir, à volonté, comme pompe simplement aspirante pour amener l'eau à la surface du sol, ou comme pompe aspirante et élévatoire pour faire parvenir l'eau aux étages supérieurs des bâtiments : il suffit, pour cela, d'adapter à la base du tuyau E de la figure 64 un petit tube de déversement comme le tube D de la figure 63. Le tube D étant garni d'un robinet, si ce robinet est ouvert, l'eau s'écoule par cet orifice; s'il est fermé, elle s'élève dans le tuyau d'ascension.

[1] L'expérience a montré que l'eau ne peut même pas, dans la pratique, atteindre cette hauteur, à cause des fuites qui se produisent entre le piston et le corps de pompe, et de l'espace nuisible qui reste toujours au-dessous du piston, quand il est au bas de sa course. Aussi ne donne-t-on guère, aux tuyaux d'aspiration, de hauteurs dépassant 8 mètres environ.

79. Pompe foulante. — La pompe foulante (*fig.* 65) se compose d'un corps de pompe CC′ entièrement immergé dans l'eau du puisard *mn*, d'un piston P, et d'un *tuyau de refoulement* R qui prend naissance à la partie inférieure du corps de pompe. A la base du corps de pompe est une ouverture, avec un clapet S s'ouvrant de dehors en dedans ; à la jonction du corps de pompe et du tuyau de refoulement est une seconde soupape *s* s'ouvrant de dedans en dehors.

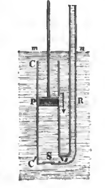


Fig. 65. Pompe foulante.

Quand le piston s'élève, l'eau se précipite dans le cylindre, en franchissant la soupape S, pour remplir le vide qui tend à se former dans le corps de pompe. Quand le piston s'abaisse, la soupape S se ferme : la pression qu'on exerce sur l'eau soulève la soupape *s*. et chasse l'eau du corps de pompe dans le tuyau d'aspiration. Dès que le liquide a atteint l'extrémité libre du tuyau de refoulement, la pompe débite, à chaque coup de piston, un volume d'eau égal à la capacité du corps de pompe. Mais l'écoulement du liquide a lieu pendant la descente du piston, tandis que, dans la pompe aspirante, c'est pendant le mouvement ascensionnel du piston qu'on voit l'eau s'écouler.

On trouve un exemple de pompe foulante dans la *pompe à incendie*, qui n'est autre chose qu'un système de deux pompes foulantes, placées au milieu d'une bâche en bois remplie d'eau ; les pistons ont des mouvements inverses, comme ceux de la machine pneumatique. Les deux pompes envoient l'eau tour à tour dans un réservoir qui contient de l'air à sa partie supérieure : cet air, refoulé par l'arrivée de l'eau, réagit par son élasticité et pousse l'eau dans un tuyau d'ascension. On obtient ainsi un jet régulier.

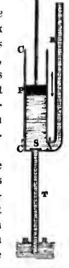


Fig. 66. Pompe aspirante et foulante

80. Pompe aspirante et foulante. — La pompe aspirante et foulante (*fig.* 66) est une combinaison des deux précédentes : elle se compose d'un tuyau d'aspiration T, d'un corps de pompe muni d'un piston plein P, et d'un tuyau de refoulement R, qui prend naissance à la base du corps de pompe. Quand le piston monte, l'eau arrive par aspiration dans le corps de pompe ; quand le piston descend, elle est refoulée dans le tube R. Le jeu des soupapes est celui qui a déjà été décrit.

Quand le tuyau de refoulement R offre une très-grande hauteur, l'eau exerce sur la face inférieure du piston une

pression énorme, et tend à chasser le liquide au travers des interstices qui se forment entre le piston et la paroi du corps de pompe. Dans ce cas, on parvient à réaliser une fermeture plus exacte au moyen d'un *piston plongeur* (*fig.* 67) : c'est un cylindre métallique P, dont la hauteur est à peu près égale à celle du corps de pompe; il ne touche pas la paroi du corps de pompe, mais il traverse une garniture d'étoupes E, solidement adaptée à la partie supérieure. Le piston prend ainsi, en descendant, la place de l'eau qui remplissait le corps de pompe, et on parvient plus facilement à rendre la fermeture hermétique.

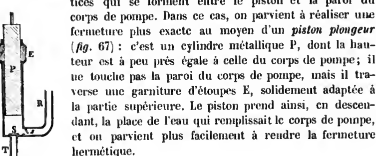


Fig. 67.

81. **Siphon.** — Le siphon est un tube recourbé, souvent employé pour faire passer des liquides d'un vase dans un autre. — Soit un tube *aca'* (*fig.* 68), dont nous supposerons les deux branches entièrement pleines d'eau, et plongeant dans des masses d'eau dont les surfaces *mn* et *m'n'* soient à des hauteurs différentes; soient *h* et *h'* les distances verticales de ces surfaces au point le plus élevé *c* du siphon. Désignons par H la pression atmosphérique évaluée *en colonne d'eau*, c'est-à-dire environ $10^m,4$.

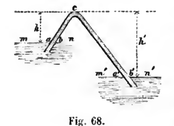


Fig. 68.

La pression atmosphérique s'exerce sur la surface *mn* à l'extérieur du tube, et se transmet en tous sens dans l'intérieur du liquide : de là résulte que la couche de liquide *ab*, intérieure au tube et située au niveau de *mn*, est sollicitée de bas en haut par la pression d'une colonne d'eau ayant pour hauteur $H-h$. De même, la couche *a' b'*, située au niveau de *m'n'*, est sollicitée de bas en haut par la pression d'une colonne d'eau ayant pour hauteur $H-h'$. De ces deux pressions qui se transmettent à tout le liquide du siphon, c'est la plus grande qui l'emporte; donc, dans la figure actuelle, l'eau est entraînée dans le tube, dans le sens *aca'*; et la pression qui détermine ce mouvement est exprimée par une colonne d'eau ayant pour hauteur $(H-h)-(H-h')$ ou bien $h'-h$. On voit que l'eau sera toujours entraînée du niveau le plus élevé vers le niveau le plus bas.

L'écoulement a lieu encore lorsque, l'une des branches *ca* du siphon plongeant dans un liquide *mn*, l'autre branche *ca'* s'ouvre dans l'atmosphère, pourvu que le liquide ait été amené dans la seconde branche au-dessous du niveau en *mn*, c'est-à-dire pourvu que le siphon ait été *amorcé*. C'est ce dont on se rendra facilement compte par un raison-

nement tout à fait semblable au précédent. — On peut amorcer le siphon en plongeant l'une des extrémités dans le liquide et aspirant avec la bouche par l'autre extrémité : mais ce procédé, ordinairement employé lorsque le liquide est de l'eau, est inapplicable quand il s'agit de liquides tels que des acides. On fait alors usage de siphons semblables à celui de la figure 69. Au voisinage de l'extrémité de la grande branche est soudé un tube ascendant *am* : on plonge la branche AB dans le liquide et l'on aspire avec la bouche par l'ouverture *m*, en bouchant avec le doigt l'extrémité C. Dès que le liquide arrive en *a*, on retire le doigt et l'on cesse d'aspirer. Tout se passe alors comme si la branche BC était coupée en *a*, puisque la pression de l'atmosphère s'exerce librement en ce point par le tube *ma*, qui reste plein d'air.

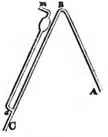


Fig. 69.

INFLUENCE DU POIDS DE L'AIR SUR LE POIDS DES CORPS QUI Y SONT PLONGÉS. — AÉROSTATS.

82. **Application du principe d'Archimède aux gaz.** — Le raisonnement simple par lequel nous avons établi le principe d'Archimède pour les corps plongés dans les liquides (33) convient, sans aucune modification, aux corps plongés dans les gaz. On peut donc considérer comme résultant des lois générales d'équilibre des fluides, le principe suivant : *Tout corps plongé dans un gaz éprouve une poussée verticale, de bas en haut, dont la valeur est égale au poid du gaz qu'il déplace.*

Dès lors, tous les corps qui sont à la surface de la terre étant plongés dans l'air qui en constitue l'atmosphère, si l'on compare la *poussée* qu'ils éprouvent à leur propre *poids*, on pourra, selon les circonstances, distinguer trois cas :

1° *Si le poids du corps est plus grand que la poussée*, c'est-à-dire si le poids du corps surpasse celui de l'air déplacé, le corps tend à tomber comme s'il était sollicité par une force unique, égale à la différence de ces deux poids, et qu'on peut appeler son *poids apparent dans l'air*. — Ce cas est celui de tous les corps solides et liquides qui nous entourent : on dit alors quelquefois qu'ils *perdent une partie de leur poids égale au poids de l'air qu'ils déplacent.*

2° *Si le poids est égal à la poussée*, le corps semble être soustrait à l'action de la pesanteur : tel est le cas des bulles de savon, gonflées avec l'air chaud des poumons, et dont la paroi liquide est assez mince pour que le poids total soit à peu près égal à celui de l'air déplacé.

3° *Si le poids est plus petit que la poussée*, la poussée l'emporte et le corps s'élève dans l'air, comme s'il était sollicité de bas en haut par une force égale à la différence entre la poussée et le poids. C'est ce qui arrive pour les ballons gonflés avec de l'hydrogène ou de l'air chaud, pour la fumée de nos cheminées, etc.

83. **Vérification expérimentale.** — On peut rendre sensible l'existence de la poussée exercée par l'air sur les corps qui y sont plongés, au moyen du *baroscope*, dont l'idée est due à Otto de Guericke.

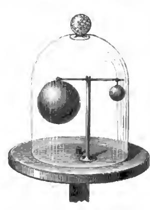


Fig. 70. — Baroscope.

Le baroscope (*fig.* 70) se compose de deux sphères métalliques creuses, suspendues aux deux extrémités d'un petit fléau de balance. Les volumes de ces sphères sont très-inégaux, mais leurs poids sont peu différents : la virole qui soutient la petite sphère permet d'en régler la distance au point de suspension, de façon que le fléau se tienne horizontalement quand l'appareil est plongé dans l'air. — On place l'instrument sur la platine de la machine pneumatique et on le couvre d'une cloche, de manière à faire le vide autour de lui. A mesure que l'air se raréfie, on voit le fléau s'incliner du côté de la plus grosse sphère. On se rend facilement compte de ce résultat si l'on remarque que, en enlevant l'air, on supprime les poussées qu'il exerçait sur les deux sphères et qui intervenaient pour rendre le fléau horizontal : la poussée étant plus grande pour la sphère la plus grosse, la suppression des poussées doit faire incliner le fléau de ce côté.

84. **Nécessité des corrections à faire subir aux pesées effectuées dans l'air.** — Toutes les pesées effectuées dans l'air sont affectées d'une erreur, due à la poussée. Quant il s'agit de corps solides ou liquides dont la densité est *considérable*, comme le platine dont la densité est environ 23, ou le mercure dont la densité est 13,6, l'erreur relative est négligeable, puisque le poids de l'air déplacé est très-petit par rapport au poids du corps lui-même. — Quand il s'agit d'un corps moins dense, il devient indispensable d'introduire des corrections que l'on effectue en tenant compte, et de la poussée éprouvée par les poids échantillonnés dont les marques indiquent la valeur dans le vide, et de la poussée éprouvée par le corps lui-même : nous n'entrerons pas ici dans le détail de ce calcul.

Enfin, quand le corps à peser ne présente qu'un poids comparable à celui de l'air qu'il déplace, quand il s'agit par exemple d'un gaz contenu

dans un ballon de verre, les corrections relatives à la poussée atteindraient une valeur de même ordre que le poids cherché : les plus petites variations de la pression atmosphérique ayant alors une influence sensible, il vaut mieux faire en sorte de n'avoir aucune correction à effectuer, en employant une tare de même volume que le ballon à peser. C'est ce qu'on verra plus loin, à propos de la détermination des densités des gaz.

85. **Aérostats.** — On donne le nom général d'*aérostats* à des appareils formés d'une enveloppe mince, dans laquelle on introduit un gaz moins dense que l'air : si le poids total du gaz, de l'enveloppe et des divers accessoires qui peuvent y être réunis est moindre que le poids de l'air déplacé, tout l'appareil s'élèvera dans l'atmosphère.

Les *montgolfières* sont des aérostats gonflés avec de l'air chaud : les premiers appareils de ce genre furent construits en 1780, par les frères Montgolfier, fabricants de papier à Annonay. C'étaient des globes de toile, doublés de papier à l'intérieur et ayant une douzaine de mètres de diamètre : on allumait un grand feu au-dessous d'une large ouverture pratiquée à la partie inférieure. On y suspendait ensuite un panier en fil de fer, rempli de matières en combustion, pour maintenir la température de l'air intérieur. — Ces appareils ont le grand inconvénient d'être trop dangereux pour que des aéronautes puissent s'aventurer dans une ascension de ce genre sans la plus grave imprudence. Malgré ces dangers, de semblables ascensions furent entreprises un certain nombre de fois, et quelques-unes coûtèrent la vie aux voyageurs. — Depuis l'invention des ballons à hydrogène, les montgolfières ne sont plus employées que dans les cas où l'on abandonne l'aérostat à lui-même, sans aéronautes.

Les *ballons* proprement dits sont des aérostats gonflés avec de l'hydrogène, ou avec le gaz d'éclairage. Le physicien Charles réussit le premier, peu de temps après les expériences des frères Montgolfier, et sans connaître le gaz employé par eux, à enlever dans les airs un ballon de 4 mètres de diamètre, dont l'enveloppe était formée de taffetas rendu imperméable par un vernis de caoutchouc.

Les ballons que l'on construit aujourd'hui ont pour enveloppe une feuille mince de caoutchouc, placée entre deux feuilles de taffetas. A la partie inférieure est une ouverture destinée à l'introduction du gaz ; à la partie supérieure, une autre ouverture garnie d'une soupape, par laquelle l'aéronaute peut laisser échapper le gaz lorsque cela devient nécessaire. Le ballon est couvert d'un filet, qui soutient une nacelle destinée à recevoir les aéronautes et le lest.

86. **Force ascensionnelle des ballons.** — On nomme *force ascensionnelle* d'un aérostat, à un moment donné, la différence qui existe

entre la poussée due à l'air qui l'environne et son poids total; elle doit avoir, au départ, une valeur de quelques kilogrammes.

Lorsque l'enveloppe du ballon, vidée autant que possible de l'air qu'elle contenait, reçoit le gaz et se gonfle progressivement, la force ascensionnelle croît à mesure que le volume augmente, et il devient bientôt nécessaire de retenir le ballon au moyen de cordes, jusqu'au moment où on veut l'abandonner. — L'enveloppe doit d'ailleurs toujours être assez vaste pour que, au départ, l'aérostat ait acquis une force ascensionnelle suffisante avant d'être complétement distendu : en effet, si son volume ne pouvait plus augmenter, quand il arrive dans les couches de l'atmosphère où la pression est moindre, il éclaterait, sous l'effort de la pression intérieure qui serait demeurée constante.

Si le ballon peut librement se distendre en s'élevant dans l'atmosphère, son volume augmente en raison inverse de la pression extérieure. Mais la poussée due au poids de l'air déplacé est égale au produit de ce volume par la densité de l'air au point considéré : d'autre part, la densité de cet air croît proportionnellement à la pression, donc la poussée éprouvée par le gaz et son enveloppe reste *constante* pendant l'ascension. Cependant il y a toujours une diminution de force ascensionnelle, due à la diminution de la poussée éprouvée par les corps non gazeux du système, dont le volume ne change pas. — Cette diminution étant toujours très-lente, il semble que la force ascensionnelle doive conserver très-longtemps une valeur sensible, et que le ballon puisse atteindre toujours des hauteurs considérables. Mais il s'opère, à travers les parois, un échange rapide de gaz ; une quantité notable d'air pénètre dans le ballon, et une partie du gaz intérieur s'échappe dans l'atmosphère : c'est là la principale cause de diminution dans la force ascensionnelle.

L'aéronaute, n'ayant autour de lui aucun point fixe qui lui permette de constater s'il monte ou s'il s'arrête, observe le baromètre, dans lequel la colonne mercurielle diminue à mesure qu'il s'élève. — S'il veut monter plus vite, il décharge la nacelle d'une partie du sable qui lui sert de lest. — S'il veut arrêter le mouvement d'ascension, il ouvre, à l'aide d'une corde qui descend dans la nacelle, la soupape qui ferme l'ouverture supérieure, de manière à laisser échapper un peu de gaz et à diminuer ainsi le volume du ballon. — C'est en réglant la sortie du gaz, ou en jetant du lest, qu'il parvient à effectuer la descente dans des conditions favorables.

87. **Calcul de la force ascensionnelle d'un ballon.** — Supposons qu'il s'agisse d'un ballon gonflé avec de l'hydrogène. Soit V le volume en mètres cubes du gaz introduit, au moment du départ, sous la pression H de l'air environnant; v le volume en mètres cubes des corps non gazeux du système, et p leur poids. On sait que le poids d'un mètre cube d'air, à $0°$ et sous la pression de 760^{mm}, est $1^{kil},3$, et

que le poids d'un mètre cube d'hydrogène, dans les mêmes conditions, est $0^{kil},09$; nous admettrons, pour n'avoir pas à tenir compte des variations de température, que la température soit partout de 0°. — Le gaz ayant un volume V sous la pression H, son volume, sous la pression de 760^{mm} serait $V\frac{H}{760}$: son poids est donc $0^{kil},09 \times V\frac{H}{760}$. De même la poussée, exprimée par le poids de l'air que déplace le gaz, est $1^{kil},3 \times V\frac{H}{760}$. L'air déplacé par les corps non gazeux du système ayant un volume v sous la pression H, son volume, sous la pression de 760^{mm}, serait $v\frac{H}{760}$; donc son poids, c'est-à-dire la poussée éprouvée par les corps non gazeux, est $1^{kil},3 \times v\frac{H}{760}$. Donc la force ascensionnelle, c'est-à-dire la différence entre la somme des poussées et la somme des poids, est

$$1^{kil},3 \times V\frac{H}{760} + 1^{kil},3 \times v\frac{H}{760} - 0^{kil},09 \times V\frac{H}{760} - p,$$

ou bien

$$(1^{kil},3 - 0^{kil},09)\,V\frac{H}{760} + 1^{kil},3 \times v\frac{H}{760} - p.$$

L'élève trouvera plus loin, comme application de l'étude de la *Chaleur*, livre II, chapitre III, la solution des questions suivantes, qui se rattachent également aux lois de l'équilibre des fluides :

Équilibre des fluides dont les diverses parties ne sont pas à la même température.

Tirage des cheminées.

LIVRE II. — CHALEUR.

CHAPITRE PREMIER.

Chaleur. — Dilatation des corps par la chaleur. — Construction et usage des thermomètres.
Usage des coefficients de dilatation des solides, des liquides et des gaz.
Densité des gaz.

DILATATION DES CORPS PAR LA CHALEUR. — THERMOMÈTRES.

88. **Chaleur.** — Le mot de *chaleur*, dans son acception usuelle, désigne la cause dont l'intervention fait que tel ou tel corps nous paraît plus ou moins *chaud*. — Cette sensation, connue de tous, est d'ailleurs purement relative à l'état de nos organes eux-mêmes ; en sorte que de l'eau tiède, dans laquelle nous plongeons la main, nous paraît chaude si notre main est froide, et froide si notre main est chaude. Ce seul exemple, auquel on pourrait en joindre bien d'autres, prouve que nos organes sont insuffisants pour évaluer le degré de chaleur des corps, et qu'il faudra avoir recours à d'autres phénomènes, susceptibles de mesure. C'est l'étude de ces phénomènes qui doit d'abord nous occuper.

Remarquons, avant tout, que la plupart des locutions employées dans le langage ordinaire et dans le langage des physiciens eux-mêmes, assimilent la chaleur à une sorte de fluide capable de se transmettre d'un corps à un autre, sans en faire varier le poids. On dira, par exemple, que les corps en combustion *produisent* de la chaleur ; que les corps *perdent* de la chaleur dans certaines circonstances, et en *gagnent* dans d'autres ; qu'un corps *cède* une partie de sa chaleur à un autre, etc. — On ne doit voir là que des locutions commodes pour représenter des phénomènes dont la cause intime nous est encore inconnue.

89. **Dilatation des corps par la chaleur.** — Les corps se dilatent quand ils s'échauffent, et se contractent quand ils se refroidissent. C'est ce que nous allons montrer par l'expérience, en opérant successivement sur des corps *solides*, *liquides* et *gazeux*.

1° *Corps solides.* — Les corps solides qui ont la forme de barre s'allongent quand on les échauffe, et se raccourcissent quand ils se refroidissent. Pour le démontrer, on fait usage du *pyromètre à levier*. — Une tige métallique horizontale AB (*fig.* 71) traverse deux colonnes métalliques C, C' : elle est fixée invariablement en A à la colonne C, au moyen d'une vis de pression ; elle passe, au contraire, librement dans une ouverture que présente la colonne C', et vient s'appuyer en B contre la plus petite branche d'un levier coudé BDE, mobile autour du point D.

L'extrémité E de la grande branche de ce levier a la forme d'une aiguille qui, dans les mouvements du levier, parcourt l'arc de cercle gradué FF'. — La tige ayant été installée froide dans l'appareil, si on vient à l'échauffer en enflammant l'alcool qui est placé dans le réservoir GG', et qu'elle

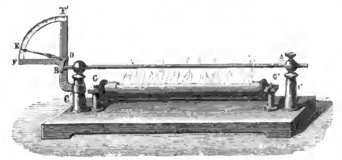


Fig. 71. — Pyromètre à levier.

s'allonge, l'extrémité B se déplacera seule et poussera devant elle la branche BD ; on verra donc la pointe de l'aiguille s'élever sur le cadran, et c'est en effet ce que montre l'expérience. L'emploi du levier BDE a l'avantage d'amplifier la dilatation de la tige ; en effet, si DE est dix fois égal à DB, par exemple, l'arc décrit par le point E a une longueur dix fois égale à celle de l'arc décrit par l'extrémité B de la petite branche, lequel se confond sensiblement avec le déplacement de l'extrémité de la tige. — Quand on laisse refroidir l'appareil, l'aiguille revient à sa position primitive, ce qui prouve que la tige se contracte et reprend sa première longueur.

Les corps solides qui ont des dimensions comparables dans les divers sens éprouvent, quand on les échauffe, une augmentation de volume qu'on peut constater au moyen de l'*anneau de S'Gravesande*. — Une sphère de cuivre S (*fig.* 72) a un diamètre tel qu'elle passe exactement, quand elle est froide, dans l'anneau de cuivre C; lorsqu'on échauffe cette sphère avec une lampe à alcool, elle ne peut plus traverser l'anneau, dans quelque sens qu'on la présente ; elle y passe au contraire de nouveau quand on la laisse refroidir. — Lorsqu'on chauffe en même temps la sphère et l'anneau, ils continuent de s'adapter exactement l'un sur l'autre, ce qui prouve que les ***espaces vides*** circonscrits par un corps solide s'accroissent, par une élévation de température,

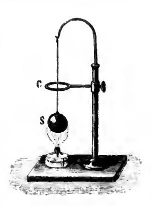


Fig. 72.
Anneau de S'Gravesande.

d'une quantité égale à l'accroissement de volume d'un corps solide de même nature, qui remplirait exactement ces espaces. C'est ainsi que la capacité intérieure d'un vase de verre augmentera comme le volume d'une masse de même verre qui remplirait cette capacité.

2° *Corps liquides.* — Prenons un ballon de verre (*fig.* 73) surmonté d'un tube étroit, et après y avoir introduit un liquide quelconque, de l'eau colorée par exemple, marquons sur un index de papier l'extrémité de la colonne liquide ; puis plongeons le ballon dans l'eau chaude. Nous verrons la dilatation du liquide faire monter rapidement le niveau du liquide vers l'extrémité du tube. — En suivant avec soin ce qui se passe dans cette expérience, on observe cependant que, au premier moment, le liquide s'abaisse dans le tube, d'une très-petite quantité, pour remonter rapidement ensuite. C'est ce qu'on s'explique en remarquant que le verre du ballon s'est échauffé le premier ; par suite, sa capacité intérieure a augmenté, et le niveau du liquide a dû descendre. Puis le liquide s'est échauffé à son tour : l'ascension définitive et continue du niveau prouve que la dilatation du liquide surpasse celle de la capacité intérieure du ballon.

B

Fig. 73.

3° *Corps gazeux.* — Un ballon de verre B (*fig.* 74), communiquant avec un tube de verre horizontal, contient le gaz soumis à l'expérience, et une petite colonne liquide *a* sépare ce gaz de l'air extérieur. Le moindre échauffement, produit par l'approche de la main, suffit pour dilater le gaz qui est dans le ballon, et pour faire marcher la colonne liquide vers l'extrémité libre du tube.

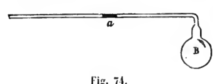


Fig. 74.

Une expérience un peu différente prouve que si, en échauffant un gaz, on s'oppose à son accroissement de volume, *sa force élastique augmente.* Un ballon de verre (*fig.* 75) communique avec un tube en S, contenant dans sa courbure inférieure un liquide coloré. Dès qu'on approche la main du ballon, on voit le liquide s'élever dans la branche ouverte, tandis que son niveau varie très-peu dans la boule pourvu que celle-ci ait des dimensions suffisantes. L'échauffement a donc eu ici pour effet, non pas d'accroître le volume du gaz, mais d'augmenter sa force élastique.



Fig. 75.

90. Température, et thermomètres en général. — Les phénomènes que nous venons de signaler nous

donnent un moyen, incomparablement plus sûr que l'emploi de nos organes, pour constater si deux corps sont également chauds, ou pour reconnaître lequel des deux est plus chaud que l'autre. — En effet, les deux corps étant mis en contact, si l'on peut constater, par un moyen quelconque, que leurs volumes demeurent invariables, c'est qu'il n'y aura eu perte ou gain de chaleur ni pour l'un, ni pour l'autre, et qu'ils étaient déjà également chauds avant d'être en présence : on dit alors qu'ils étaient *à la même température*. — Au contraire, si l'un des deux se dilate, l'autre se contractant, c'est que le second était plus chaud que le premier, ou *à une température plus élevée*.

Au lieu de mettre ainsi directement en contact les corps dont on veut comparer les températures, ce qui offrirait souvent des difficultés pratiques, on se sert d'instruments intermédiaires, fondés également sur les dilatations, et qui prennent alors le nom de *thermomètres*.

Les *thermomètres* sont donc des instruments destinés à indiquer, par les volumes qu'ils acquièrent, les différences de température que présentent les corps avec lesquels on les met en contact. Afin que leurs indications aient une signification précise, on leur donnera toujours une masse suffisamment petite pour qu'ils ne modifient pas eux-mêmes sensiblement la température primitive de ces corps.

91. Construction du thermomètre à mercure. — Le thermomètre à mercure se compose d'un *réservoir* de verre cylindrique R (*fig.* 76), se continuant avec une *tige* de verre capillaire : le réservoir et une partie de la tige contiennent du mercure, et une graduation tracée sur le tube permet de déterminer exactement la position du sommet de la colonne liquide. — Nous allons décrire succinctement les opérations à effectuer pour construire un semblable thermomètre.

Les ouvriers qui travaillent le verre livrent aux physiciens des enveloppes de thermomètres, qu'il reste seulement à emplir et à graduer. Ces enveloppes ont été façonnées en choisissant d'abord, pour former la tige, un tube capillaire *bien calibré*, c'est-à-dire ayant une section intérieure bien uniforme : on reconnaît qu'un tube satisfait à cette condition en constatant qu'une bulle de mercure, introduite dans l'intérieur et promenée le long de ce tube, y présente toujours une longueur constante. Une boule de verre B (*fig.* 77), surmontée d'une pointe effilée, a été soudée à l'une des extrémités de la tige ; à l'autre extrémité l'ouvrier a soufflé, aux dépens de l'épaisseur du tube, un réservoir en forme d'olive. Puis la pointe effilée a été fermée, afin que



Fig. 76.

la poussière et l'humidité ne pénètrent pas dans l'appareil. — Au moment où l'on veut procéder à l'emplissage, on brise cette pointe; on chauffe légèrement la boule pour en dilater l'air, et, renversant brusquement l'appareil, on plonge la pointe dans le mercure : le refroidissement de l'air intérieur fait monter du mercure dans la boule B. Quand on juge qu'il en est entré une quantité suffisante pour qu'elle doive emplir le réservoir et une partie de la tige, on redresse l'instrument : c'est cette phase de l'opération qui est représentée par la figure 77. — On chauffe légèrement le réservoir R, en tenant le thermomètre dans une position inclinée, et on voit l'air sortir en bulles au travers du mercure de la boule : quand on laisse refroidir, l'air qui reste encore dans le réservoir se contractant, il y pénètre une certaine quantité de mercure. Il suffit alors de faire bouillir ce mercure pour que la vapeur entraîne les dernières traces d'air : on a eu soin d'échauffer en même temps le mercure de la boule, afin qu'il ne brise pas l'appareil quand il arrivera dans les parties chaudes; dès lors, quand on cesse de chauffer le réservoir, la vapeur mercurielle se condense, et le mercure chaud qui est dans la boule achève de remplir le réservoir et une partie de la tige.

B

R

Fig. 77.

L'emplissage du thermomètre terminé, on détache la boule B, et pour ne laisser dans l'instrument que la quantité convenable de mercure, on le porte à une température dépassant un peu la plus haute de celles qu'il doit indiquer : l'excédant du mercure s'échappe, et, pendant que la tige est encore pleine, on fond au chalumeau l'extrémité supérieure de manière à la fermer. On a ainsi un thermomètre vide d'air. — Parfois, au contraire, on ménage à la partie supérieure de la tige un petit réservoir à air M (*fig.* 76) qui servirait à empêcher la rupture de l'appareil s'il arrivait que le thermomètre fût soumis accidentellement à une température plus élevée.

92. **Points fixes.— Graduation du thermomètre centigrade**. — Pour graduer un thermomètre, on commence par marquer sur sa tige les niveaux correspondants à deux températures déterminées, prises comme *points fixes*, et choisies de telle manière qu'on puisse toujours les reproduire identiquement.

La première de ces températures est celle de la *glace fondante*; l'expérience a montré, en effet, que cette température est toujours la même, quel que soit l'état de l'air ambiant, et qu'elle demeure invariable pen-

dant tout le temps que dure la fusion — On emplit donc de neige, ou de glace pilée fondante, un vase cylindrique de métal dont le fond est percé de trous (*fig.* 78), et on y enfonce l'instrument de manière que la colonne liquide soit entièrement plongée dans la glace. Lorsque, en soulevant la tige de temps en temps, on constate que le sommet du liquide est devenu stationnaire, on marque avec un pinceau le point auquel il s'est arrêté. — Ce sera le *zéro* du thermomètre.

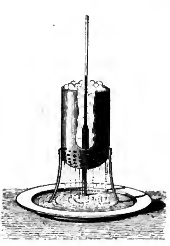


Fig. 78.

La seconde des températures prises comme points fixes est celle de la ***vapeur d'eau bouillante***, sous la pression de 760 millimètres. C'est en effet encore une température constante, pourvu que la pression ne varie pas. On emploie l'appareil qui est représenté en coupe par la figure 79 : la vapeur se produit dans une petite chaudière E, placée sur un fourneau : elle s'élève dans la cheminée centrale M, et redescend dans l'espace NN qui enveloppe le tube M, pour s'échapper en C. Dans l'espace M est placé le thermomètre, fixé en A au moyen d'un bouchon ; l'enveloppe NN, occupée par la vapeur, préserve l'espace M de tout refroidissement. La vapeur doit s'échapper assez facilement en C, pour que sa force élastique en M soit toujours égale à la pression atmosphérique : c'est ce dont on s'assure en observant un petit manomètre à eau, adapté à une tubulure B qui communique avec la cheminée centrale ; les niveaux du liquide *m* et *n* doivent être sur un même plan horizontal. Le thermomètre doit être placé de façon que la colonne liquide soit plongée tout entière dans la vapeur, et son ré-

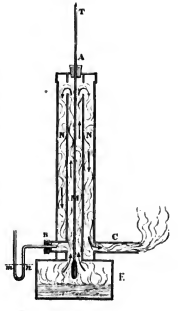


Fig. 79.

servoir doit se trouver un peu au-dessus de la surface de l'eau bouillante. — Lorsque, en faisant glisser un peu le thermomètre dans son bouchon pour apercevoir le sommet de la colonne, on a constaté qu'il conserve un niveau constant, on marque sur la tige le point correspondant. Ce sera le point 100 de la graduation, pourvu que la pression atmosphérique, au moment de l'expérience, s'écarte très-peu de la pression normale 760 millimètres [1].

Pour achever de graduer le thermomètre, on partage en cent parties égales la distance qui sépare les deux points fixes sur la tige : chacune de ces divisions est un ***degré*** du thermomètre. — On continue à marquer des divisions égales aux précédentes, au-dessus du centième degré, ce sont les degrés qu'on désigne par 101, 102, etc. On marque encore des divisions égales au-dessous du zéro, et on les désigne par les chiffres 1, 2, 3, etc., qui forment ainsi une échelle descendante indiquant les températures inférieures au point de fusion de la glace. — Pour distinguer facilement, dans les notations, les températures correspondantes à un certain nombre de degrés ***au-dessous de zéro***, on fait précéder du signe (—) les chiffres qui indiquent ces températures. Ainsi, — 12° désigne une température de 12 degrés au-dessous de zéro ; et, par opposition, + 25° ou simplement 25° désigne une température de 25 degrés au-dessus de zéro. Ces quantités positives et négatives peuvent être introduites dans les calculs, avec les conventions que l'on fait dans les cas analogues.

93. **Déplacement lent du zéro.** — Lorsqu'on cherche à vérifier la position du zéro sur un thermomètre construit depuis un certain temps, en replaçant l'instrument dans la glace fondante, on observe presque toujours que le point où s'arrête le mercure est remonté d'une ou deux divisions. Ce résultat doit être attribué, d'après des expériences de Despretz, aux changements moléculaires qu'éprouve le verre dans les premiers temps qui suivent son refroidissement, après qu'il a été fondu pour être façonné à la lampe. — Avant d'employer un thermomètre pour des observations précises, il est donc indispensable de déterminer par l'expérience le nombre de divisions dont le zéro peut s'être déplacé, et de retrancher ce nombre à toutes indications fournies par l'instrument.

94. **Différentes échelles thermométriques.** — Nous venons d'indiquer la graduation du thermomètre, en employant une échelle d'après laquelle on divise en 100 degrés égaux l'intervalle entre les deux tem-

[1] On cherche, en général, à faire l'expérience sous une pression qui s'écarte peu de la pression normale : cependant si, au m ment de la détermination du point 100, la pression était notablement différente de 760 millimètres, on pourrait faire subir à l'échelle une correction ; on en calculerait la valeur en sachant que, pour un accroissement ou une diminution de pression de 27 millimètres, la température de la vapeur d'eau s'élève ou s'abaisse de 1 degré.

pératures de la glace fondante et de la vapeur d'eau bouillante. Cette échelle porte, pour cette raison, le nom d'échelle ***centigrade***, et est exclusivement employée aujourd'hui en France, parce que c'est celle dont le mode de division se rapproche le plus du système décimal. — Nous dirons quelques mots de deux autres échelles.

1° L'échelle de ***Réaumur***, imaginée en 1731, longtemps usitée en France et employée encore en Allemagne, emploie les mêmes points fixes que l'échelle centigrade : la température de la glace fondante est prise pour zéro du thermomètre, mais la température de la vapeur d'eau bouillante est marquée 80°; l'intervalle est partagé en 80 parties égales. Les deux échelles sont souvent marquées, l'une en face de l'autre, sur la planchette qui supporte certains thermomètres.

Il est toujours facile, étant donnée une température évaluée en degrés Réaumur, de calculer le nombre de degrés centigrade qui la représente, ou réciproquement. — En effet, 80 degrés de Réaumur valent 100 degrés centigrade; donc 1 degré de Réaumur vaut $\frac{100}{80}$ ou $\frac{10}{8}$ de degré centigrade. Donc, pour convertir des degrés de Réaumur en degrés centigrade, il suffira de multiplier par $\frac{10}{8}$. — Réciproquement, pour convertir des degrés centigrade en degrés de Réaumur, il suffira de multiplier par $\frac{8}{10}$.

2° L'échelle de ***Fahrenheit***, imaginée en 1714 d'après des idées théoriques particulières, est encore employée aujourd'hui en Angleterre et aux États-Unis. Fahrenheit déterminait le zéro de son instrument au moyen d'un mélange, formé de poids égaux de sel ammoniac et de glace pilée; le point fixe supérieur était la température de la vapeur d'eau bouillante, mais en ce point il marquait 212. En comparant cette échelle à l'échelle centigrade, on trouve que la température de la glace fondante correspond au 32° degré de Fahrenheit.

Dès lors, la conversion de ces degrés en degrés centigrade, et la conversion réciproque, ne seront que des questions d'arithmétique. — On remarquera que l'intervalle entre la température de la glace fondante et celle de la vapeur d'eau bouillante comprend 212 — 32 c'est-à-dire 180 degrés de Fahrenheit, et 100 degrés centigrade : donc 1 degré de Fahrenheit vaut $\frac{100}{180}$ ou $\frac{10}{18}$ de degré centigrade. Cela posé, quelle que soit la question à résoudre, la marche générale à suivre consistera à considérer d'abord ***l'intervalle compris entre la glace fondante et la température donnée, à réduire cet intervalle en degrés de la nouvelle échelle, et à compter ces degrés à partir de leur zéro.*** — Appliquons cette règle à quelques exemples.

Soit une température de 86° Fahrenheit à évaluer en degrés centigrades. L'intervalle compris entre la glace fondante et cette température est de 86 — 32, ou 54 degrés de Fahrenheit ; cet intervalle vaut, en degrés centigrade, $54 \times \frac{10}{18}$ ou 30 ; et comme les degrés centigrade se comptent à partir de la glace fondante, la température donnée correspond à celle de 30° C. — *Soit encore une température de 14° F. à évaluer au moyen de l'échelle centigrade.* L'intervalle compris entre la glace fondante et cette température est de 32 — 14 ou 18 degrés de Fahrenheit : cet intervalle équivaut à $27 \times \frac{10}{18}$ ou 15 degrés centigrade, et comme cette température est inférieure à celle de la glace fondante, elle correspond à celle de — 15° C. — On trouvera, de la même manière, que le *zéro de Fahrenheit* correspond à la température — 17°,78 C.

Inversement, *soit une température de 19° C. à évaluer au moyen de l'échelle de Fahrenheit.* Les degrés centigrade étant comptés à partir de la glace fondante, on remarquera immédiatement que l'intervalle entre la glace fondante et la température donnée vaut, en degrés de Fahrenheit, $19 \times \frac{18}{10} = 34{,}2$. Comme d'ailleurs l'échelle de Fahrenheit marque 32° à la glace fondante, la température proposée correspond à celle de 34,2 + 32 ou de 66°,2 F.

95. **Thermomètre à alcool.** — Le thermomètre à alcool, un peu moins coûteux que le thermomètre à mercure, a en outre l'avantage de pouvoir évaluer des températures inférieures au point de congélation du mercure, c'est-à-dire à — 40°. En revanche, il ne peut servir à des températures élevées, le point d'ébullition de l'alcool étant à 78°,5. — Dans les thermomètres grossièrement construits qui servent pour les usages ordinaires de la vie, l'alcool est coloré en rouge par la teinture d'orseille; ce liquide a l'inconvénient de s'altérer à la longue.

Le procédé d'emplissage de cet instrument est plus simple que celui du thermomètre à mercure : la boule B de la figure 77 est ici inutile. Il suffit de dilater un peu l'air du réservoir, par une légère élévation de température, et de plonger dans l'alcool l'extrémité ouverte de la tige, pour voir une petite quantité de liquide arriver dans le réservoir. On redresse ensuite l'instrument, on fait bouillir cette petite quantité de liquide, dont les vapeurs achèvent de chasser l'air, et, comme l'ébullition a lieu ici à une température qui ne dépasse pas 78°,5, on peut sans inconvénient plonger de nouveau la tige dans l'alcool et laisser arriver le liquide froid dans le réservoir. — La graduation peut s'effectuer comme celle d'un thermomètre à mercure : cependant, comme la vapeur de mercure acquiert, à 100°, une force élastique qui pourrait faire éclater l'enveloppe, on se contente souvent de déterminer, au lieu de la température

de la vapeur d'eau bouillante, un point moins élevé de l'échelle, par exemple la température d'un bain d'eau chaude, qu'on évalue au moyen d'un thermomètre à mercure.

96. **Instruments thermométriques en général.** — Les liquides offrent, pour la construction des instruments thermométriques, l'avantage de présenter des variations de volume appréciables, pour les variations de température qu'on peut avoir à déterminer dans les circonstances les plus fréquentes. Parmi les liquides, le mercure doit être préféré à tout autre : les températures les plus communes sont en effet comprises entre son point de congélation, qui est à — 40°, et son point d'ébullition, qui est à + 360°; il peut en outre être obtenu toujours dans un état de pureté parfaite; enfin, comme il conduit bien la chaleur, il se met rapidement en équilibre de température avec les corps environnants.

Les corps gazeux se dilatent, pour une même élévation de température, beaucoup plus que les corps liquides : ils doivent donc fournir des thermomètres beaucoup plus sensibles, c'est-à-dire appréciant des variations de température beaucoup plus petites. Ces thermomètres auront encore cet avantage qu'on pourra toujours comparer les indications de divers instruments construits avec un même gaz, mais avec des verres différents, puisque la dilatation de l'enveloppe sera tout à fait négligeable vis-à-vis de celle du gaz lui-même. C'est ce qui n'a pas lieu rigoureusement pour les thermomètres à liquides. — Nous reviendrons plus loin sur l'usage des *thermomètres à gaz*, qui sont les meilleurs pour les expériences précises.

Les corps solides se dilatent, pour une même élévation de température, beaucoup moins que les corps liquides; aussi n'ont-ils guère été employés que pour évaluer des variations considérables : c'est ainsi qu'on a pu faire usage, pour déterminer la température des fours à porcelaine, d'un instrument analogue au pyromètre à levier (*fig.* 71). — Mais les corps solides offrent toujours l'inconvénient de présenter, au bout de quelque temps, des variations de structure intérieure; leur dilatation, outre qu'elle est relativement très-faible, est donc aussi variable.

97. **Pyromètre de Wedgwood.** — Le *pyromètre de Wedgwood* est fondé, non plus sur les dilatations et contractions successives qu'éprouvent les corps quand on les échauffe ou qu'on les refroidit, mais sur la propriété que présente l'argile d'éprouver une modification profonde, quand on la soumet à une température assez élevée, et en même temps un *retrait permanent* d'autant plus grand que cette température a été plus haute. — De petits cylindres d'argile, façonnés dans le même moule, sont introduits dans les fourneaux dont on veut évaluer approximativement la température : lorsqu'on les en a retirés, on les introduit dans l'intervalle de deux règles métalliques, solidement fixées sur une plaque, et faisant entre elles un angle invariable. On peut faire avancer ces cylindres dans

l'angle des règles d'autant plus loin qu'ils ont subi un retrait plus grand : une graduation marquée sur l'une des règles fait connaître, d'une manière approximative, la température correspondante.

DILATATIONS DES CORPS SOLIDES.

98. **Définition des coefficients de dilatation.** — Le *coefficient de dilatation linéaire* d'une règle solide est ***le nombre qui exprime l'allongement de l'unité de longueur*** de cette règle ***pour une élévation de température de 1 degré.*** — Le coefficient de dilatation linéaire sera toujours évalué au moyen de l'unité qui aura servi à mesurer la longueur de la règle elle-même : en sorte que si, par exemple, la longueur de la règle est évaluée en mètres, le coefficient de dilatation linéaire devra être exprimé en prenant le mètre pour unité.

Le *coefficient de dilatation cubique* d'un corps solide est ***le nombre qui exprime l'accroissement de volume éprouvé par l'unité de volume*** de ce corps ***pour une élévation de température de 1 degré.*** — Ce nombre devra également être évalué au moyen de l'unité qui aura servi à mesurer le volume du corps lui-même : en sorte que si, par exemple, le volume du corps est évalué en mètres cubes, le coefficient de dilatation cubique devra être exprimé en prenant pour unité le mètre cube.

99. **Usage de ces coefficients.** — 1° *Étant donnée la longueur* l_0 *d'une règle à zéro, et son coefficient de dilatation linéaire* δ, *calculer la longueur* l *de cette règle à une température quelconque* t.

L'unité de longueur s'allongeant de δ quand sa température s'élève de zéro à 1 degré, si l'on admet, comme nous le ferons toujours, que l'allongement soit encore le même pour tout accroissement de température d'un degré, c'est-à-dire que la règle se dilate de la même quantité δ en passant de 1° à 2°, puis encore de δ en passant de 2° à 3°, et ainsi de suite, l'allongement total de l'unité de longueur en passant de 0° à t sera δt; par suite, une règle de longueur l_0 se dilatera, dans les mêmes conditions, de $l_0\delta t$. La longueur de cette règle sera donc $l_0 + l_0\delta t$, c'est-à-dire qu'on aura

$$(1) \qquad l = l_0\,(1 + \delta t).$$

Pour abréger, nous désignerons la quantité qui est comprise dans la parenthèse sous le nom de *binôme de dilatation;* et nous dirons que, ***pour avoir la longueur d'une règle à une température quelconque, il suffit de multiplier la longueur à zéro par le binôme de dilatation correspondant à cette température.***

2° Réciproquement, *étant donnée la longueur* l *d'une règle à une température connue* t, *et son coefficient de dilatation linéaire* δ, *calculer sa longueur* l_0 *à la température de zéro.*

La formule (1) donne immédiatement

$$(2) \qquad l_0 = \frac{l}{1+\delta t}.$$

Pour avoir la longueur à zéro, il suffit donc de diviser la longueur primitive par le binôme de dilatation.

3° *Étant donnée la longueur* l *d'une règle à une température* t, *et son coefficient de dilatation* δ, *calculer sa longueur* l' *à une température quelconque* t'.

On a, d'après ce qui précède :

$$l = l_0\,(1+\delta t)$$
$$l' = l_0\,(1+\delta t');$$

en divisant la seconde équation par la première, il vient

$$\frac{l'}{l} = \frac{1+\delta t'}{1+\delta t},$$

d'où l'on tire :

$$(3) \qquad l' = l\,\frac{1+\delta t'}{1+\delta t}.$$

Telle est la relation exacte qui donne l' en fonction de l. Dans la pratique on en peut employer une autre, qui est seulement *approchée* : effectuons la division indiquée dans la formule (3), et, dans le quotient obtenu, négligeons les termes qui contiennent δ^2, δ^3...; ces termes sont en effet toujours très-petits par rapport aux autres, puisque δ est une fraction très-petite, comme on le voit à la simple inspection du tableau de la page 80; il vient

$$(3\ bis) \qquad l' = l\,[1+\delta(t'-t)].$$

Cette relation approchée offre, avec la formule (1), une analogie digne de remarque : elle permet de dire que, soit qu'on parte de la température zéro ou de toute autre température t, la longueur l', correspondante à une température t', s'obtient toujours en multipliant la longueur initiale par le binôme de dilatation correspondant à la *variation de température.*

4° *Étant donné le volume* V_0 *d'un corps à zéro, et son coefficient de dilatation cubique* k, *calculer le volume de ce corps à une autre température* t.

Un raisonnement absolument semblable à celui que nous avons fait plus haut (1°) montre que, k étant l'accroissement de volume éprouvé par l'unité de volume pour une élévation de température de 1 degré, le volume V_0, en passant à t, s'accroîtra de $V_0 kt$; donc le volume total sera $V_0 + V_0 kt$, ou bien

$$(4) \qquad V = V_0\,(1+kt).$$

5° Réciproquement, *étant donné le volume* V *d'un corps à une température connue* t, *et son coefficient de dilatation cubique* k, *calculer son volume* V_0 *à la température de zéro.*

En résolvant l'équation (4) par rapport à V_0, il vient

$$(5) \qquad V_0 = \frac{V}{1+kt}.$$

6° *Étant donné le volume* V *d'un corps à une température* t, *et son coefficient de dilatation cubique* k, *calculer son volume* V' *à une autre température quelconque* t'.

On a, d'après ce que nous venons de voir :

$$V = V_0 (1 + kt)$$
$$V' = V_0 (1 + kt').$$

En divisant la seconde équation par la première, il vient

$$\frac{V'}{V} = \frac{1+kt'}{1+kt},$$

d'où l'on tire :

$$(6) \qquad V' = V \frac{1+kt'}{1+kt}.$$

A cette relation on peut substituer encore la suivante, obtenue en effectuant la division indiquée, et négligeant les puissances de k supérieures à la première

$$(6\ bis) \qquad V' = V_0 [1 + k (t' - t)],$$

relation *approchée* qui donne lieu aux mêmes remarques que la relation (3 *bis*).

100. Le coefficient de dilatation cubique d'un corps est sensiblement triple de son coefficient de dilatation linéaire. — Il faut entendre par là que le *nombre* qui exprime l'accroissement de volume éprouvé par l'unité de volume est sensiblement triple du *nombre* qui exprime l'allongement de l'unité de longueur.

Soit V_0 le volume du corps à zéro, V_1 son volume à 1°, k son coefficient de dilatation cubique; on a, en faisant $t = 1$ dans la formule (4) :

$$V_1 = V^0 (1 + k).$$

Si maintenant a_0 est la longueur de l'une des dimensions du corps à zéro, et a_1 sa longueur à 1°, δ étant le coefficient de dilatation linéaire, on a, en faisant $t = 1$ dans la formule (1) :

$$a_1 = a_0 (1 + \delta).$$

Or le corps est resté semblable à lui-même, en sorte que les volumes,

à ces deux températures, sont dans le rapport des dimensions homologues, et l'on a :

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{a_1^3}{a_0^3},$$

ou bien

$$\frac{V_0(1+k)}{V_0} = \frac{a_0^3(1+\delta)^3}{a_0^3},$$

ou, en supprimant les facteurs communs et effectuant les calculs :

$$k = 3\delta + 3\delta^2 + \delta^3.$$

Or, δ étant toujours une fraction très-petite, le carré et le cube de cette fraction peuvent être négligés à côté du premier terme 3δ, et l'on a sensiblement

$$k = 3\delta.$$

Ce résultat montre que, si l'on a déterminé au moyen d'expériences précises les coefficients de dilatation linéaire de certains corps, on pourra se dispenser d'autres expériences pour déterminer les coefficients de dilatation cubique des mêmes substances ; il suffira de tripler les nombres déjà obtenus. — Inversement, la connaissance des coefficients de dilatation cubique fournirait immédiatement les coefficients de dilatation linéaire.

101. **Principe de la méthode de Lavoisier et Laplace, pour déterminer les coefficients de dilatation linéaire.** — Le principe de la méthode suivie par Lavoisier et Laplace, pour déterminer les coefficients de dilatation linéaire des corps solides, consiste à rendre plus sensibles les allongements des barres sur lesquelles on opère, au moyen d'un artifice semblable à celui qui a déjà été employé dans le pyromètre à levier (89).

Les barres étaient posées sur des rouleaux de verre, dans une auge où l'on pouvait placer à volonté de la glace fondante ou de l'eau bouillante

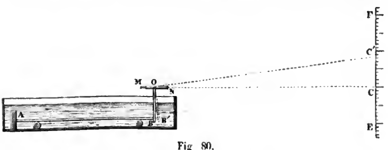


Fig 80.

(*fig.* 80). L'une de leurs extrémités A était maintenue immobile par un talon fixe ; l'autre extrémité B s'appuyait contre une tige verticale, mo-

bile autour d'un axe horizontal O, et supportant une lunette MN. Une régle divisée EF était dressée verticalement à une certaine distance. — La barre étant d'abord environnée de glace fondante, on déterminait la division C de la régle qui se trouvait dans le prolongement de l'axe de la lunette. On versait ensuite de l'eau bouillante dans l'auge : la barre s'allongeant, la tige verticale était amenée à une nouvelle position OB′, et on déterminait la nouvelle division C′ qui se trouvait dans le prolongement de l'axe de la lunette. Les triangles semblables BOB′ et COC′ donnent :

$$\frac{BB'}{CC'} = \frac{OB}{OC},$$

d'où l'on tire :

$$BB' = CC' \frac{OB}{OC}.$$

Les quantités OB et OC ayant été déterminées une fois pour toutes avec précision, l'observation du déplacement CC′ faisait connaître, dans chaque expérience, l'allongement de la barre. — Il suffisait ensuite, pour avoir le coefficient de dilatation, c'est-à-dire l'allongement de l'unité de longueur pour une élévation de température de 1 degré, de diviser BB′ par la longueur de la barre et par l'accroissement de température.

COEFFICIENTS DE DILATATION LINÉAIRE DE QUELQUES CORPS SOLIDES.

Acier trempé.	0, 000 013
Argent.	0, 000 019
Cristal.	0, 000 008
Cuivre.	0, 000 017
Fer.	0, 000 012
Laiton.	0, 000 019
Or.	0, 000 015
Platine.	0, 000 009
Verre ordinaire.	0, 000 009

102. **Applications des dilatations des corps solides. — Pendules compensateurs.** — Lorsqu'on emploie un pendule pour régulariser le mouvement d'une horloge, il est important de remarquer que la durée des oscillations de ce pendule ne conserve une valeur constante que si le pendule lui-même conserve toujours la même longueur, quelles que soient les variations de température.

L'un des systèmes les plus employés, pour *compenser* les variations de longueur qui tendent à se produire sous l'influence des changements de température est le *pendule à gril* (*fig.* 81). Les tiges verticales qui le composent, et dont le mode d'assujettissement est indiqué par la figure, sont les unes en fer, les autres en laiton (les tiges de laiton sont indiquées

par des hachures transversales). On voit, avec un peu d'attention, que la dilatation des tiges de fer tend à abaisser le centre de la lentille pesante C, et que la dilatation des tiges de laiton tend à le relever : d'autre part, le laiton est plus dilatable que le fer, mais la somme des longueurs $b + b'$ des tiges de laiton est moindre que la somme des longueurs $a + a' + a'' + a'''$ des tiges de fer. Soit δ le coefficient de dilatation linéaire du laiton; δ' celui du fer : si l'on veut que, en passant de la température de zéro à la température t, le pendule conserve la même longueur, il suffira d'égaler entre eux les effets qui sont produits, en sens inversé, par le laiton et par le fer, ce qui donne :

$$(b + b')\,\delta t = (a + a' + a'' + a''')\,\delta' t,$$

d'où l'on tire :

$$\frac{b + b'}{a + a' + a'' + a'''} = \frac{\delta'}{\delta}.$$

Ce rapport entre ces deux sommes de longueur est indépendant de la température, de sorte que la compensation, une fois réalisée, aura lieu à toutes les températures possibles.

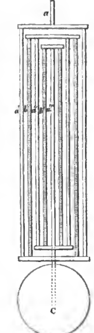


Fig. 81.
Pendule à gril.

DILATATIONS DES LIQUIDES.

103. Dilatation apparente et dilatation absolue d'un liquide. — Les liquides dont on observe les dilatations sont placés dans des vases dont la capacité intérieure augmente quand la température s'élève : par suite, l'accroissement apparent du volume du liquide, ou sa *dilatation apparente*, n'est que la différence entre son accroissement de volume réel ou *dilatation absolue*, et la dilatation du vase. — Le coefficient de dilatation absolue est, comme pour les corps solides, le nombre qui exprime l'accroissement de volume éprouvé par l'unité de volume de ce liquide, pour une élévation de température de 1 degré.

De ce que nous venons de dire il résulte que, pour déterminer les valeurs numériques des coefficients de dilatation des liquides, ou pour employer ces coefficients aux calculs de dilatation dans des circonstances déterminées, on devra tenir compte, en général, et de la dilatation réelle des liquides, et de celle des vases dans lesquels les liquides seront placés. — Cependant la méthode suivante, due à Dulong et Petit, permet d'ob-

tenir le coefficient de dilatation absolue d'un liquide, sans avoir à tenir compte de la dilatation du vase : nous indiquerons le principe de cette méthode qui a été appliquée par eux au mercure.

104. **Principe de la méthode de Dulong et Petit, pour déterminer le coefficient de dilatation absolue du mercure.** — Le mercure est contenu dans un tube en U formé de deux branches verticales AB, CD (*fig.* 82) réunies par un tube capillaire BEFD : la branche EF est placée de façon que son axe soit *parfaitement horizontal*. La branche AB est environnée de glace fondante; la branche CD est placée dans un bain d'huile, et portée à une température connue. Les liquides des deux branches, étant à des températures différentes, ont des densités inégales que nous pouvons désigner par d_0 et d : les hauteurs h_0 et h des surfaces m et n, au-dessus de l'axe du tube EF, sont en raison inverse de ces densités; c'est-à-dire qu'on a $\frac{h}{h_0} = \frac{d_0}{d}$. D'autre part, d_0 et d sont inversement proportionnels aux volumes u et $u(1+\alpha T)$ que prendrait une même masse de mercure à zéro et à T degrés, c'est-à-dire que $\frac{d_0}{d} = \frac{u(1+\alpha T)}{u} = 1 + \alpha T$. Donc on a :

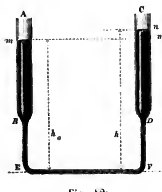


Fig. 82.

$$\frac{h}{h_0} = 1 + \alpha T.$$

De cette équation on tire la valeur de α, c'est-à-dire du coefficient de dilatation absolue du mercure :

$$\alpha = \frac{h - h_0}{h_0 T}.$$

En opérant avec un appareil fondé sur ce principe, et dont les détails de construction ne peuvent trouver place ici, Dulong et Petit ont trouvé, pour le coefficient de dilatation absolue du mercure, la valeur $\frac{1}{5550}$ ou bien 0,000 18018.

105. **Principe de la détermination des coefficients de dilatation absolue des autres liquides.** — La méthode précédente pourrait servir à déterminer de même les coefficients de dilatation absolue des autres liquides. Cependant, une fois le coefficient de dilatation du mercure connu, on a préféré employer pour les autres liquides

des méthodes différentes, dont nous allons indiquer seulement le principe.

Un vase de verre ayant, soit la forme indiquée par la figure 84, soit la forme d'un thermomètre ordinaire, est d'abord rempli de mercure : en portant l'appareil successivement à la température de zéro et à la température T, on observe la dilatation apparente du mercure dans le verre : comme on connaît déjà la dilatation absolue de ce liquide, on en conclut la dilatation du verre qui constitue l'enveloppe. — Cela fait, on retire le mercure, et on le remplace par le liquide dont on se propose de déterminer la dilatation. En portant encore l'appareil successivement à la température de zéro et à une autre température, on observe la dilatation apparente du liquide dans l'enveloppe. Comme on connaît maintenant la dilatation de l'enveloppe, on en conclut la dilatation absolue du liquide lui-même : par suite, la dilatation de l'unité de volume pour une élévation de température de 1 degré, c'est-à-dire le coefficient de dilatation absolue.

Nous nous contenterons ici de ces indications générales : le calcul de chacune de ces expériences est du même genre que ceux qui ont été déjà donnés, ou qui seront donnés plus loin (108).

106. **Maximum de densité de l'eau.** — Supposons que, dans une enveloppe thermométrique, on ait introduit de l'eau pure, et que, plaçant ce thermomètre à eau à côté d'un thermomètre à mercure, dans un même bain, on élève la température de ce bain. S'il était primitivement à 15°, par exemple, on verra les deux liquides monter à la fois, bien que de quantités inégales dans les deux instruments. Au contraire, si, partant de cette même température de 15°, on refroidit progressivement le bain, on observera l'anomalie suivante : les liquides s'abaisseront d'abord simultanément, mais, quand la température s'abaissera au-dessous de 4°, on verra le niveau de l'eau remonter, tandis que celui du mercure continuera à descendre. De là on conclut qu'il existe, au voisinage de 4°, une température à laquelle le volume de l'eau est minimum, et où, par suite, la densité présente un *maximum*.

L'existence de ce *maximum de densité* peut encore être constatée par l'expérience suivante : — Une éprouvette de verre M (*fig.* 85) contient de l'eau jusqu'à sa partie supérieure : deux thermomètres A et B, assujettis dans des ouvertures que présente l'éprouvette, sont placés horizontalement, l'un dans les couches supérieures du liquide, l'autre dans les couches inférieures : une galerie métallique C, entourant la

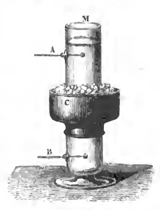


Fig. 85.

partie moyenne de l'éprouvette, contient de la glace. Si l'eau de l'éprouvette était d'abord à 12°, par exemple, on voit le thermomètre inférieur baisser plus vite que le thermomètre supérieur, ce qui indique que les couches d'eau refroidies dans la partie moyenne augmentent de densité et tombent au fond : c'est donc seulement quand ces couches sont remplacées à leur tour par d'autres plus froides encore, qu'elles viennent refroidir le thermomètre A. Mais, lorsque B est arrivé à 4°, il demeure stationnaire, tandis que A continue à baisser rapidement, et sa température descend même beaucoup au-dessous de 4°. Ce résultat tient à ce que les couches d'eau refroidies en C au-dessous de 4° acquièrent une densité *moindre*, et remontent à la surface; au contraire, les couches qui entourent B ayant la température de 4° et la densité maximum, elles restent au fond et la température marquée par le thermomètre reste invariable.

Des phénomènes semblables se produisent dans les lacs, où la température, à partir d'une certaine profondeur, reste toujours égale à 4°, soit pendant les chaleurs de l'été, soit pendant les froids de l'hiver. On voit, en effet, que les variations de la température extérieure ayant toujours pour effet de donner aux couches voisines de la surface une densité moindre que celle des parties profondes, il ne doit pas s'effectuer de mélange. — Grâce à ces circonstances, les poissons et les animaux aquatiques trouvent toujours des couches liquides où ils puissent vivre, même pendant les plus grands froids, et quand la surface s'est abaissée bien au-dessous du point de congélation.

107. **Applications des dilatations des liquides. — Corrections barométriques.** — Les hauteurs barométriques étant à des temperatures très-différentes, suivant les époques auxquelles on les détermine, on ne peut comparer ces hauteurs entre elles qu'à la condition de les ramener toutes, par le calcul, à ce qu'elles auraient été à une même température : on a choisi la température de zéro.

Soit H une hauteur barométrique exprimée en millimètres, hauteur observée directement, à une température t. — Remarquons d'abord que cette hauteur a été déterminée sur une règle, de laiton par exemple, que l'on doit supposer graduée à la température de zéro ; cette règle s'est dilatée en s'élevant à la température t, et, si δ est le coefficient de dilatation linéaire du laiton, chaque millimètre est devenu $1^{mm}(1+\delta t)$; la hauteur observée est donc égale, en réalité, à $H(1+\delta t)$. — Désignons maintenant par H_0 la hauteur de la colonne de mercure à zéro, qui exercerait la même pression ; cette colonne sera à la colonne $H(1+\delta t)$ dans le rapport inverse des densités du mercure d_0 et d aux températures zéro et t, c'est-à-dire qu'on aura :

$$\frac{H_0}{H(1+\delta t)} = \frac{d}{d_0},$$

d'autre part, les densités d_0 et d sont entre elles dans le rapport inverse

des volumes d'une même masse de mercure à zéro et à t; de sorte que si v_0 est le volume de cette masse de mercure à zéro, et α le coefficient de dilatation du mercure, on a :

$$\frac{d}{d_0}=\frac{v_0}{v_0(1+\alpha t)}=\frac{1}{1+\alpha t},$$

ce qui donne définitivement :

$$H_0=H\frac{1+\delta t}{1+\alpha t}.$$

108. **Thermomètre à poids.** — Un réservoir de verre cylindrique (*fig.* 84), terminé par un tube capillaire deux fois recourbé, a été rempli exactement de mercure, et, le réservoir étant plongé dans la glace fondante, on maintient la pointe au milieu du mercure placé dans un petit godet, de sorte que l'appareil achève de se remplir complétement à la température de zéro. On a déterminé à l'avance le poids π de l'appareil vide; on détermine son poids P quand il est plein de mercure à zéro; $P-\pi$ est le poids du mercure qui le remplit à zéro. — On introduit l'appareil dans l'enceinte dont on se propose de déterminer la température t, on recueille à part le mercure qui s'échappe par la pointe, et on le pèse; soit p son poids. — Désignons par d_0 la densité du mercure à 0° (égale, comme on sait, à 13,6), par α le coefficient de dilatation absolue du mercure, et par k le coefficient de dilatation du verre. Le volume à zéro du mercure qui est sorti de l'appareil est $\frac{p}{d_0}$; par suite, son volume à t était $\frac{p}{d_0}(1+\alpha t)$. Ce volume est égal à l'excès du volume acquis à t degrés par la quantité totale de mercure, sur le volume intérieur de l'enveloppe à cette même température : or la quantité totale de mercure avait, à zéro, un volume $\frac{P-\pi}{d_0}$, et cette expression désigne aussi le volume intérieur de l'enveloppe à zéro; on aura donc



Fig. 84.

$$\frac{p}{d_0}(1+\alpha t)=\frac{P-\pi}{d_0}(1+\alpha t)-\frac{P-\pi}{d_0}(1+kt),$$

d'où l'on déduira, en effectuant les simplifications et tirant la valeur de t :

$$t=\frac{p}{(P-\pi)(\alpha-k)-p\alpha}.$$

Remarque. — La même équation permettrait, comme on le voit, de calculer le coefficient de dilatation k du verre, si l'on avait porté l'appareil à une température connue, à 100° par exemple. — Ce coefficient k une fois déterminé, si l'on introduisait dans l'appareil un autre liquide,

les données de l'expérience permettraient d'obtenir le coefficient de dilatation absolue α du liquide. C'est la méthode dont nous avons indiqué plus haut le principe (105).

DILATATIONS DES GAZ.

109. **Définitions.** — *Le coefficient de dilatation* d'un gaz est *le nombre qui exprime l'accroissement de volume éprouvé par l'unité de volume de ce gaz, pour une élévation de température de 1 degré.*

L'expérience a montré que ce nombre est sensiblement *le même, quelle que soit la pression à laquelle le gaz est soumis, pourvu que cette pression demeure la même.* — En outre il présente, d'un gaz à l'autre, des différences tellement petites, que nous pourrons considérer à l'avenir *tous les gaz* comme ayant *le même coefficient de dilatation.* — Ces principes ne cesseraient d'être vrais que si l'on opérait dans des conditions où les gaz fussent très-voisins de leurs points respectifs de liquéfaction : nous les admettrons, dans tout ce qui va suivre, comme rigoureusement exacts.

110. **Usages du coefficient de dilatation des gaz.** — Lorsque la température d'un gaz varie, sa pression demeurant constante, on a, en désignant par α son coefficient de dilatation, et par V_0, V et V' les volumes qu'il occupe aux températures 0, t et t', des relations analogues à celles qui ont été précédemment établies pour les corps solides (99, 4°, 5° et 6°) :

$$V = V_0(1 + \alpha t),$$

$$V_0 = V \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

$$V' = V \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

Mais, la pression variant souvent en même temps que la température, nous aurons à résoudre, pour les gaz en particulier, un problème plus général :

Connaissant le volume V *d'une masse gazeuse à la température* t *et sous la pression* H, *calculer son volume* V' *à la température* t' *et sous la pression* H'. — Supposons d'abord que la pression seule varie, et soit V_1 le volume qu'occuperait le gaz à la température t et sous la pression H' : la loi de Mariotte donne :

$$V_1 = V \frac{H}{H'}.$$

Supposons maintenant que la température passe de t à t' ; on aura, d'après ce qu'on vient de voir :

$$V' = V_1 \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t},$$

et, en remplaçant V_1, dans cette formule, par la valeur précédente :

$$(7) \qquad V' = V \frac{H}{H'} \cdot \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

111. Une question analogue est la suivante : ***Connaissant la densité*** D ***d'un gaz à la température*** t ***et sous la pression*** H, ***calculer sa densité*** D' ***à la température*** t' ***et sous la pression*** H'. — Il est clair que les densités D et D' sont en raison inverse des volumes V et V' occupés successivement par une même masse gazeuse, quelconque d'ailleurs : or, d'après la formule précédente, on a :

$$\frac{V}{V'} = \frac{H'}{H} \cdot \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'};$$

donc on aura :

$$\frac{D'}{D} = \frac{H'}{H} \cdot \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'},$$

ou bien

$$(8) \qquad D' = D \frac{H'}{H} \cdot \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'}.$$

En particulier, si l'on se proposait de calculer la densité dans les conditions *normales* de température et de pression, c'est-à-dire à 0 degré, et sous la pression de 760 millimètres, on aurait $D' = D \frac{760}{H} (1 + \alpha t)$; formule qui est d'un usage fréquent.

112. Principe de la méthode de Gay-Lussac, pour déterminer le coefficient de dilatation des gaz. — Pour déterminer la valeur numérique du coefficient de dilatation des gaz, Gay-Lussac

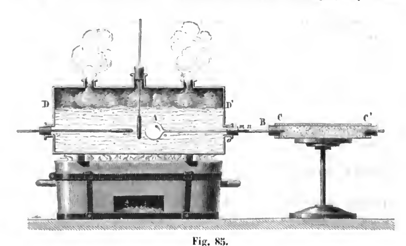


Fig. 85.

introduisait le gaz soumis à l'expérience dans une enveloppe AB (*fig.* 85).

ayant la forme de celle d'un thermomètre à grand réservoir, et dont la tige était divisée en parties d'égales capacités; il avait déterminé d'avance le rapport entre la capacité du réservoir et celle d'une division de la tige. Dans la tige était une petite colonne de mercure *mn*, séparant le gaz de l'atmosphère extérieure. L'appareil était placé dans une caisse métallique DD', et on le portait successivement à la température de la glace fondante, et à une température T, qui était à peu près celle de l'eau bouillante, et qui était évaluée par des thermomètres à mercure : on notait les deux positions successives de l'index de mercure; soient V_0 et V les volumes apparents du gaz, dans ces deux circonstances, volumes évalués en divisions de la tige. — On voit immédiatement que, le vase de verre s'étant dilaté à la température T, si l'on désigne par k le coefficient de dilatation cubique du verre, le volume réel du vase à cette température était $V(1+kT)$. L'accroissement de volume du gaz était donc $V(1+kT)-V_0$, et par suite le coefficient de dilatation α, c'est-à-dire l'accroissement éprouvé par l'unité de volume, pour une élévation de température de 1 degré, était donné par la formule :

$$\alpha = \frac{V(1+kT)-V_0}{V_0 1}.$$

En opérant ainsi, Gay-Lassac a trouvé, pour les divers gaz soumis à ses expériences, le nombre 0,00375.

Des expériences plus précises, de M. Regnault, ont donné pour coefficient de dilatation de l'air le nombre 0,00367. — En opérant sur les gaz qui sont éloignés de leur point de liquéfaction, il a trouvé également que leur coefficient de dilatation s'écarte très-peu de cette valeur.

115. **Application de la dilatation des gaz. — Thermomètre à air.** — L'expérience de Gay-Lussac permet de déterminer la température T de l'espace dans lequel est plongé l'enveloppe de verre, si l'on suppose connu le coefficient de dilatation du gaz α (égal à 0,00367) : on tire, en effet, de l'équation précédente :

$$T = \frac{V-V_0}{\alpha V_0 - V k}.$$

L'appareil prend alors le nom de *thermomètre à air*. — On voit immédiatement qu'un appareil de ce genre doit offrir une grande sensibilité à cause de la valeur, relativement très-grande, du coefficient de dilatation des gaz.

D'autres thermomètres à air ont été employés, d'abord par M. Pouillet, pour mesurer les températures élevées, puis par M. Regnault. — Ils doivent être considérés comme les thermomètres par excellence, pour les expériences de précision. Ils offrent cet avantage que les indications de plusieurs instruments de ce genre, construits avec des

verres différents, sont toujours comparables entre elles; en effet, la dilatation des gaz étant environ 140 fois égale à celle du verre, les petites différences que peuvent présenter deux verres quelconques disparaissent à côté de la dilatation du gaz. Le principal inconvénient qu'ils présentent est d'exiger, pour chaque évaluation de température, une manipulation assez longue, ce qui empêchera toujours d'en faire des instruments usuels.

DENSITÉS DES GAZ.

114. **Définitions.** — En adoptant pour les gaz la définition qui a été donnée pour les poids spécifiques en général, on obtiendrait, pour chacun d'eux, des nombres très-petits, puisque le poids d'un volume déterminé de gaz est toujours très-faible par rapport au poids du même volume d'eau. — On a été conduit alors à comparer ce poids à celui d'un même volume d'air, et l'on appelle *densité d'un gaz le rapport qui existe entre les poids de volumes égaux de ce gaz et d'air, pris l'un et l'autre dans les mêmes conditions de température et de pression.*

La densité d'un gaz, ainsi définie, éprouve quelques variations, peu considérables toujours, mais cependant sensibles, surtout pour les gaz voisins de leur point de liquéfaction, quand on la détermine en donnant des valeurs diverses à cette température et à cette pression qui sont, dans chaque cas, communes au gaz et à l'air. — Pour supprimer toute indétermination, il est préférable d'appeler plus spécialement *densité d'un gaz, le rapport qui existe entre le poids de volumes égaux du gaz et d'air, pris l'un et l'autre à la température de zéro et sous la pression de 760 millimètres.*

115. **Principe de la méthode employée pour déterminer les densités des gaz.** — Pour obtenir la densité d'un gaz, on effectuera successivement deux opérations absolument semblables :

1° Détermination du poids de gaz qui remplit, à la température de zéro et sous une pression connue, la capacité d'un ballon de verre : ce qui permettra de calculer immédiatement, au moyen de la loi de Mariotte, le poids de gaz que contiendrait ce ballon, à la même température de zéro, et sous la pression de 760 millimètres;

2° Détermination semblable du poids d'air qui remplit le même ballon dans les mêmes conditions.

Il suffira de diviser le premier poids par le second pour obtenir la densité.

Quant au procédé à suivre dans ces deux déterminations, nous indiquerons, sans entrer dans les détails, celui qu'a adopté M. Regnault, et qui permet d'obtenir avec exactitude les données de l'expérience. — Le

ballon de verre, qui a une capacité d'une dizaine de litres et qui est muni d'une garniture à robinet, est placé dans un grand réservoir contenant de la glace fondante. On y fait le vide à l'aide de la machine pneumatique, et on y laisse entrer le gaz préparé à l'avance ; pour être plus certain que le ballon ne contient plus de traces d'air, on fait le vide de nouveau, on laisse de nouveau entrer du gaz, et ainsi de suite à plusieurs reprises ; le gaz arrive d'ailleurs toujours au ballon en traversant des tubes qui contiennent des substances destinées à le dessécher et à le purifier. Après la dernière rentrée du gaz, on laisse pendant quelques instants le ballon en communication avec l'atmosphère, par l'intermédiaire des tubes desséchants : on peut admettre que sa pression, au moment où l'on ferme le robinet, est égale à la pression atmosphérique H, mesurée au moyen d'un bon baromètre. On retire alors le ballon de la glace; après l'avoir essuyé avec soin, on le suspend sous l'un des plateaux de la balance, et on en fait la tare. — Ces opérations faites, il semble qu'il ne reste plus qu'à extraire du ballon le gaz qu'il contient, et à déterminer, avec la balance, sa perte de poids. Ce procédé serait impraticable, puisque la machine pneumatique ne peut arriver à un vide absolu. M. Regnault a eu recours à l'artifice suivant : le ballon étant replacé dans la glace fondante, en enlève avec la machine pneumatique la plus grande partie du gaz qu'il contient, et on mesure, au moyen d'un manomètre, la force élastique ε du gaz restant. On replace alors le ballon sous le plateau de la balance, et on rétablit l'équilibre en ajoutant, dans le même plateau, une certaine quantité p de poids marqués : ce poids est celui du gaz qui a été enlevé par la machine. Or, la pression dans le ballon ayant diminué de la quantité $H-\varepsilon$, p est le poids de gaz qui occuperait le volume du ballon sous la pression $H-\varepsilon$ et à la température de zéro (68). Donc, d'après la loi de Mariotte, le poids de gaz qui remplirait le même volume à zéro et sous la pression de 760 millimètres serait $p\frac{760}{H-\varepsilon}$.

On fera, avec de l'air desséché, la même série d'expériences, et, en désignant par H', ε', p' les quantités analogues à H, ε, p, on aura, pour poids de l'air qui emplirait le ballon à zéro et sous la pression de 760 millimètres, $p'\frac{760}{H'-\varepsilon'}$.

En divisant l'un par l'autre ces deux poids, on obtient la densité cherchée :

$$d=\frac{p}{p'}\,\frac{H'-\varepsilon'}{H-\varepsilon}.$$

Enfin, nous ajouterons quelques mots sur la nature de la *tare* employée dans ces diverses pesées. — Le ballon éprouve, lorsqu'il est suspendu à la balance, une poussée de la part de l'air environnant; cette poussée

dépend des conditions de pression, de température et d'humidité dans lesquelles se trouve l'air extérieur. Or, si ces conditions restent les mêmes lors des pesées du ballon plein de gaz et du ballon vide, il est aisé de voir que p exprime toujours le poids de gaz enlevé par la machine, comme si la poussée n'existait pas. Si, au contraire, les conditions atmosphériques ont changé, ces variations, en augmentant ou diminuant le poids apparent du ballon pendant l'opération, seront une cause d'erreur qui pourra avoir une valeur très-appréciable par rapport au poids à déterminer. Il en est d'ailleurs de même dans les pesées effectuées sur l'air. — Pour éviter les corrections qu'on devrait faire subir aux résultats, M. Regnault emploie, comme tare du ballon A, un autre ballon A′ (*fig.* 86), fabriqué avec le même verre et présentant le même volume extérieur : on le suspend au-dessous de l'autre plateau de la balance, et l'on achève d'établir l'équilibre, soit avec de la grenaille de plomb, soit en ajoutant un peu de mercure dans le ballon. Les deux ballons flottent dans l'atmosphère d'une armoire vitrée, au-dessus de laquelle est la cage de balance, et dont l'air est desséché par de la chaux vive. Quelles que soient d'ailleurs les variations atmosphériques, les poussées éprouvées de part et d'autre restent égales, et tout se passe comme si les pesées étaient faites dans le vide.

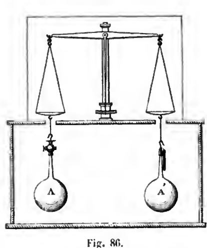


Fig. 86.

En suivant cette méthode, on obtient, par exemple, les résultats suivants :

DENSITÉS DE QUELQUES GAZ, PAR RAPPORT A L'AIR A 0°, ET SOUS LA PRESSION DE 760 MILLIMÈTRES.

Air.	1,0000
Azote.	0,9714
Oxygène.	1,1056
Hydrogène.	0,0693
Acide carbonique.	1,5291
Oxyde de carbone.	0,9569
Acide sulfureux.	2,1930

116. Poids du litre d'air. — La seconde partie de l'expérience précédente a donné le poids de l'air que contiendrait le ballon à la température de zéro et sous la pression normale; c'est

$$p' \frac{760}{H' - \varepsilon'}.$$

— On voit que pour avoir le poids d'un litre d'air, dans ces mêmes conditions, il suffit de déterminer le volume du ballon en litres à la même température. C'est ce qu'on fait en emplissant le ballon d'eau à zéro, et le pesant ensuite exactement. En divisant le poids précédent par le nombre de litres trouvé, on obtient le poids du litre d'air à zéro, et sous la pression de 760 millimètres. Ce poids est 1gr,293.

117. Calcul du poids spécifique d'un gaz par rapport à l'eau. — Le poids d'un litre d'air étant 1gr,293, si l'on veut obtenir le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau, on devra prendre le rapport de ce poids à celui du même volume d'eau, c'est-à-dire à 1000 grammes. On obtient ainsi le nombre 0,001293, ou sensiblement 0,0013. — Dès lors, le poids spécifique d'un gaz quelconque par rapport à l'eau s'obtiendra en multipliant le nombre précédent par la densité du gaz rapportée à l'air. Ainsi, la densité de l'acide carbonique par rapport à l'air étant 1,529, le poids spécifique de ce gaz par rapport à l'eau sera

$$0{,}001293 \times 1{,}529 = 0{,}001977.$$

118. Problème. — *Calculer le poids d'un volume donné* V *d'un gaz, à la température* t *et sous la pression* H.

Soit d la densité du gaz par rapport à l'air : d'après ce qui a été vu précédemment (111), le poids spécifique du gaz par rapport à l'eau, à t degrés et sous la pression H, est :

$$0{,}001293 \times d \times \frac{H}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t};$$

par suite, si le volume V est exprimé, par exemple, en *litres*, le poids exprimé en *kilogrammes* sera :

$$P = V \times 0{,}001293 \times d \times \frac{H}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

Il suffira, dans chaque cas particulier, d'effectuer les calculs indiqués dans le second membre, en substituant à chaque lettre sa valeur numérique.

CHAPITRE II.

Passage de l'état solide à l'état liquide, et passage inverse de l'état liquide à l'état solide. — Chaleur latente. — Mélanges réfrigérants.
Passage de l'état liquide à l'état de vapeur. — Formation des vapeurs dans le vide. — Maximum de leur force élastique. — Mesure de la force élastique maximum de la vapeur d'eau à diverses températures, par le procédé de Dalton. Ébullition. — Chaleur latente. — Condensation. — Distillation.

PASSAGE DE L'ÉTAT SOLIDE A L'ÉTAT LIQUIDE, ET PASSAGE INVERSE.

119. **Fusion.** — Lorsqu'on porte un corps solide à des températures de plus en plus élevées, il arrive en général un moment où il passe à l'état liquide : on dit alors qu'il entre en *fusion*. — Ce phénomène est soumis aux deux lois suivantes :

1° *Un même corps entre toujours en fusion à la même température.*

2° *Pendant tout le temps que dure la fusion, la température du corps reste constante.*

Nous avons déjà signalé ces deux lois pour la fusion de la glace (92); elles nous ont permis de déterminer sans incertitude le point fixe inférieur du thermomètre.

Le *point de fusion* de la glace est donc, par définition même, la température de zéro degré centigrade. — Il est d'ailleurs extrêmement variable d'un corps à l'autre, comme le montre le tableau suivant :

POINTS DE FUSION DE QUELQUES CORPS SOLIDES.

Mercure.	—40°	Plomb.	320°
Glace.	0°	Zinc.	360°
Suif.	+33°	Argent.	1000°
Phosphore.	43°	Fonte blanche.	1100°
Cire blanche.	68°	Fonte grise.	1200°
Soufre.	111°	Acier.	1400°
Étain.	230°	Fer.	1500°

On a considéré longtemps comme infusibles un certain nombre de substances auxquelles on donnait le nom de *réfractaires*. A mesure qu'on est parvenu à produire des températures plus élevées, on a vu le nombre de ces substances diminuer chaque jour. — Ainsi, en alimentant la flamme d'une lampe au moyen d'oxygène pur, M. Gaudin a pu fondre le quartz (cristal de roche); en activant de même la flamme du gaz d'éclairage et opérant dans un four en chaux vive, MM. Deville et Debray sont parvenus à couler le platine en lingots. Quelques années auparavant, Despretz, en concentrant les rayons solaires à l'aide d'une large lentille, et employant

simultanément l'action calorifique d'un courant électrique intense et d'un chalumeau à gaz oxygène et hydrogène, a fondu la magnésie et l'alumine, et ramolli des baguettes de charbon de manière à les courber. — Il est donc permis de présumer qu'avec des sources de chaleur suffisamment intenses, on parviendrait à fondre tous les corps solides, à l'exception d'un certain nombre de corps composés, dont les éléments se dissocient avant qu'ils entrent en fusion.

120. **Chaleur latente de fusion.** — Lorsqu'un corps, placé sur un foyer de chaleur, atteint la température à laquelle il commence à fondre, sa température reste constante, ainsi qu'il a été dit plus haut, pendant tout le temps que dure la fusion. De là il résulte que, pendant tout ce temps, la quantité de chaleurfournie par le foyer est employée à produire le changement d'état, *sans élever la température :* un thermomètre plongé dans la masse n'accuse plus le gain de chaleur qu'éprouve le corps, et on dit que cette chaleur devient *latente.* — Cette seule remarque suffit pour montrer qu'il y a absorption d'une certaine quantité de *chaleur latente de fusion*, quand un corps passe de l'état solide à l'état liquide.

Une expérience simple permet encore de mettre en évidence la chaleur latente de fusion, pour la glace en particulier, et d'obtenir même une mesure de la chaleur absorbée dans ce changement d'état. — On mélange 1 kilogramme de glace à zéro et 1 kilogramme d'eau à 79 degrés : toute la glace fond, et l'on obtient, à la fin de l'expérience, 2 kilogrammes d'eau à la température de zéro. Ce résultat montre que la chaleur abandonnée par le kilogramme d'eau, qui était à 79 degrés et qui est descendue à zéro, a été employée tout entière à fondre le kilogramme de glace, *sans élever sa température.*

121. **Solidification.** — La plupart des liquides, lorsqu'on les refroidit suffisamment, *se solidifient.* — Le phénomène de la solidification est soumis aux deux lois suivantes :

1° *Un même liquide se solidifie toujours à la même température, qui est précisément celle de la fusion du solide dans lequel il se transforme.*

2° *Pendant tout le temps que dure la solidification, la température du corps reste constante.*

De ces lois il résulte que toute la chaleur accumulée dans le liquide, et devenue latente au moment de la fusion, redevient libre lorsque le corps se solidifie : c'est cette chaleur qui, en se dégageant, empêche le corps de se refroidir davantage, tant que certaines de ses parties sont encore liquides.

122. **Retard du point de solidification.** — La température à laquelle un liquide commence à se solidifier est toujours sensiblement la même que celle de la fusion du solide dans lequel il peut se transformer, quand on a soin de maintenir la masse liquide dans un état d'agitation convenable. Au contraire, lorsque la masse est dans un repos absolu,

on observe que la température peut s'abaisser beaucoup au-dessous du point de fusion, sans que la solidification s'opère : c'est ainsi qu'une masse d'eau parfaitement tranquille pourra être refroidie jusqu'à 10 ou 12 degrés au-dessous de zéro sans se congeler. Mais si l'on vient à imprimer au vase un mouvement vibratoire, ou bien à y projeter un fragment de glace, la congélation s'effectue aussitôt dans une grande partie du liquide; il y a alors dégagement de chaleur latente de la part des points solidifiés, et l'on observe que le thermomètre remonte à zéro. Si les causes réfrigérantes continuent d'agir, la solidification se poursuit régulièrement. — Ce phénomène du *retard du point de solidification* n'a pas encore reçu d'explication complétement satisfaisante.

123. **Accroissement de volume de l'eau au moment de sa solidification.** — Lorsqu'un corps liquide passe à l'état solide, le plus souvent son volume diminue, et par suite sa densité augmente; il suffit, pour s'en convaincre, de remarquer que les fragments de soufre solide, par exemple, restent au fond d'une masse de soufre liquide; il en est de même de la cire, du plomb et des métaux en général. — Au contraire, les glaçons flottent à la surface de l'eau demeurée liquide: la densité de la glace est donc moindre que celle de l'eau (elle en est les 0,9 environ). L'augmentation de volume de l'eau, au moment où elle se congèle, s'effectue même avec une force d'expansion que mettent en évidence plusieurs expériences remarquables. Un canon de pistolet rempli d'eau, hermétiquement fermé par un boulon à vis, et placé dans un mélange réfrigérant, se brise en éclats quand le liquide intérieur se congèle. C'est à cette force d'expansion de la glace qu'il faut attribuer la désagrégation, pendant l'hiver, des pierres qui ont reçu le nom de *gélives*. C'est encore à ce phénomène qu'est due l'action funeste des gelées sur les végétaux : bien que, dans les espaces capillaires qui constituent les tissus organisés, l'eau éprouve un retard dans son point de solidification, il suffit de quelques heures d'un froid intense pour amener la congélation de la séve, et briser complétement les parois de ces tissus.

124. **Dissolution.** — On nomme *dissolution* le phénomène qui se produit lorsqu'un liquide, mis en présence d'un corps solide, le fait passer à l'état liquide et se mélange intimement avec lui. — La dissolution, lorsqu'elle ne se complique d'aucune autre action exercée entre les corps qui sont en présence, est toujours accompagnée d'une absorption de chaleur latente, et ressemble en cela à la fusion ordinaire : par suite, dans toute dissolution d'un corps solide par un corps liquide, il y a abaissement de température. Ainsi la dissolution de l'azotate d'ammoniaque, dans un poids d'eau égal au sien, fait descendre le mélange à 10 ou 15 degrés au-dessous de zéro.

S'il arrive que le corps solide, se dissolvant d'abord dans le liquide, tende à former avec lui une combinaison chimique, ce second phénomène

produit toujours une élévation de température, et l'on n'observe plus que la superposition de ces deux effets. Par suite, l'effet définitif peut être, soit un abaissement de température peu marqué, soit même une élévation de température. — Ainsi un grand nombre de sels anhydres, en se dissolvant dans l'eau, tendent en même temps à prendre un certain nombre d'équivalents d'eau, pour se convertir en sels hydratés : la dissolution de ces sels est souvent accompagnée d'un dégagement de chaleur très-sensible. — Un mélange de 4 parties d'acide sulfurique et de 1 partie de glace élève la température jusqu'à 100 degrés. Un mélange de 1 partie d'acide sulfurique et de 4 parties de glace produit un froid qui descend jusqu'à — 20°.

125. **Mélanges réfrigérants.** — On peut obtenir des mélanges réfrigérants en faisant simplement dissoudre des sels hydratés dans l'eau ou dans des acides étendus : tel est, par exemple, le mélange d'azotate d'ammoniaque et d'eau, à poids égaux, dont nous avons déjà parlé. Tel est aussi le mélange de 8 parties de sulfate de soude et de 5 parties d'acide chlorhydrique, qui est souvent employé en été pour fabriquer artificiellement de la glace; le mélange est introduit dans un vase de fer-blanc, au milieu duquel on plonge un autre vase contenant le liquide à congeler.

En remplaçant l'eau par de la glace pilée ou par de la neige, on obtient des mélanges réfrigérants plus énergiques. On conçoit en effet que, dans ce cas, la glace absorbe de la chaleur latente pour se fondre, et le sel en absorbe encore à son tour en se dissolvant dans l'eau de fusion. Le changement d'état s'accomplissant d'ailleurs en un temps très-court, la chaleur absorbée surpasse de beaucoup celle qui peut être restituée au mélange par l'air ou par les corps environnants. — C'est ainsi qu'un mélange de 2 parties de neige à zéro et de 1 partie de sel marin à la température ordinaire, peut descendre jusqu'à —21 degrés. — Avec un mélange de 4 parties de chlorure de calcium monohydraté et de 3 parties de neige, on peut, en prenant des précautions convenables, obtenir un froid de — 50 degrés.

PASSAGE DE L'ÉTAT LIQUIDE A L'ÉTAT DE VAPEURS.

126. **Formation des vapeurs dans le vide.** — On donne le nom général de *vaporisation* à la transformation des liquides en vapeurs : ces vapeurs sont de véritables gaz, c'est ce que démontrera l'étude de leurs propriétés. — Nous nous occuperons d'abord de la formation des vapeurs dans le vide : les phénomènes se présenteront ainsi avec plus de simplicité; il sera facile de passer de là à la formation des vapeurs dans un espace occupé par un autre gaz.

Plusieurs tubes barométriques C, D, E, F (*fig.* 87) étant installés dans

une même cuvette, introduisons dans l'un d'eux D, à l'aide d'une pipette recourbée, une petite quantité d'eau; en E, de l'alcool; en F, de l'éther. Dès que ces liquides se seront élevés jusqu'à la surface du mercure, dans la chambre barométrique, on verra le mercure s'abaisser : la dépression la plus petite sera celle de l'eau *m' p';* celle de l'alcool *m'' p''* sera un peu plus considérable, et enfin celle de l'éther *m''' p'''* sera beaucoup plus grande.

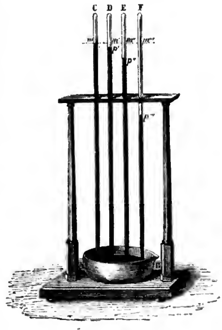


Fig. 87.

Ces dépressions mesurent la force élastique de la vapeur formée par chacun des liquides, comme elles mesureraient la force élastique d'un gaz introduit dans la chambre barométrique. On peut donc dire que les liquides donnent instantanément naissance, dans le vide, à des vapeurs douées d'une force élastique semblable à celle des gaz; la valeur de cette force élastique, à une température déterminée, dépend de la nature de la vapeur.

127. **Force élastique maximum des vapeurs saturantes.** — Lorsque, en faisant l'expérience précédente, on a introduit une quantité de liquide suffisante pour qu'il y en ait un excès en contact avec la vapeur formée, il est évident que la chambre barométrique contient autant de vapeur qu'elle en peut contenir à la température de l'expérience : on dit alors que l'espace est *saturé*, ou que la vapeur est *saturante*.

Dans ces conditions, si l'on cherche à augmenter la force élastique de la vapeur en diminuant l'espace qu'elle occupe, on constate que la force élastique reste constante, et qu'une partie de la vapeur se liquéfie. — L'expérience, qui serait difficile à réaliser avec l'appareil de la figure 87, se fait sans peine à l'aide du baromètre à cuvette profonde (*fig.* 53). On introduit, dans la chambre bien purgée d'air, une quantité suffisante d'éther : la force élastique de la vapeur réduit la colonne mercurielle à la hauteur MN' (*fig.* 88), une petite quantité d'éther restant encore à l'état liquide :

on peut alors diminuer le volume de cette vapeur en enfonçant le tube (*fig.* 89), sans que la hauteur du mercure MN″ soit modifiée. La vapeur avait donc acquis immédiatement un ***maximum de tension*** qu'on ne peut lui faire dépasser : une partie de la vapeur se condense d'ailleurs au moment où l'on diminue son volume.

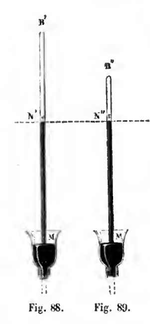


Fig. 88. Fig. 89.

Inversement, si on soulève le tube de manière à accroître le volume de la vapeur, on voit encore la hauteur mercurielle rester constante : donc la force élastique de la vapeur ne diminue pas, mais une nouvelle quantité d'éther se vaporise. Le phénomène reste le même tant qu'il reste du liquide à convertir en vapeur, c'est-à-dire tant que la vapeur reste saturante.

Enfin, supposons que l'espace laissé à la vapeur soit assez grand pour qu'il ne reste pas de trace de liquide; on observe alors, en soulevant et abaissant successivement le tube, que la force élastique de la vapeur varie en raison inverse de son volume, pourvu que la compression de la vapeur ne soit jamais assez grande pour en liquéfier une partie. — Donc une vapeur ***non saturante*** possède une force élastique qui est soumise à la même loi que la force élastique d'un gaz proprement dit, c'est-à-dire à la loi de Mariotte (65).

128. Mesure de la force élastique maximum de la vapeur d'eau, entre zéro et 100 degrés, par le procédé de Dalton. — La valeur de la force élastique maximum d'une vapeur dépend essentiellement de la température : par exemple, si l'on compare les résultats obtenus dans les expériences précédentes, en opérant successivement pendant l'hiver et pendant l'été, on constatera que la tension de la vapeur saturante, toujours la même tant que la température sera invariable, a une valeur d'autant plus grande que la température est plus élevée. — La détermination de la force élastique maximum à diverses températures offre un intérêt spécial pour la vapeur d'eau en particulier, au point de vue des applications.

L'appareil de Dalton (*fig.* 90) permet de mesurer la tension maximum de la vapeur d'eau aux températures comprises entre zéro et 100 degrés. — Deux baromètres A et B sont installés dans une cuvette de fonte C placée sur un fourneau F : dans l'un A on a introduit une petite colonne d'eau, de manière que la chambre soit toujours saturée de vapeur;

l'autre B est un baromètre *sec*, c'est-à-dire ne contenant que du mercure. Les deux tubes sont entourés d'un manchon de verre renfermant de l'eau jusqu'en *mn*, en sorte que cette colonne d'eau déprime un peu le mercure à l'intérieur du manchon, et le soulève à l'extérieur. Lorsqu'on chauffe la cuvette, la chaleur se transmet, du mercure à l'eau du manchon, et par suite au liquide renfermé dans le tube A. En portant l'appareil à des températures graduellement croissantes et indiquées par des thermomètres fixés au milieu de l'eau, on voit le sommet de la colonne mercurielle s'abaisser en A; pour chaque température en particulier, Dalton déterminait la dépression du mercure dans le baromètre à vapeur B, au-dessous du niveau dans le baromètre sec A, au moyen d'une règle métallique graduée. — Cette dépression ne peut être prise pour mesure de la force élastique maximum qu'à la condition de subir préalablement une correction, semblable à celle qui a été indiquée pour les hauteurs barométriques (107). On devra tenir compte également, si l'on veut obtenir un résultat précis, du poids de la petite colonne d'eau qui surmonte le mercure en A, et enfin des actions capillaires qui tiennent aux formes différentes des surfaces du mercure et de l'eau.



Fig. 90. — Appareil de Dalton.

Les résultats fournis par ces expériences montrent que la tension maximum de la vapeur d'eau, égale à $4^{mm},6$ au voisinage de zéro, acquiert la valeur de 760^{mm} à la température de 100 degrés. A cette température, le niveau du mercure dans le baromètre à vapeur descend jusque dans le plan du mercure de la cuvette : cet appareil ne peut donc pas servir à déterminer les tensions pour des températures supérieures à 100 degrés, alors même qu'on remplacerait l'eau du manchon par un autre liquide entrant en ébullition à une température plus élevée.

129. **Force élastique maximum de la vapeur d'eau à des températures inférieures à zéro ou supérieures à 100 degrés.** — Les expériences de Gay-Lussac ont montré que la glace émet encore, à des températures inférieures à zéro, des vapeurs

ayant une tension sensible. — Pour mesurer cette tension, il installait dans une même cuvette deux baromètres, l'un sec, et l'autre contenant de l'eau : la partie supérieure de la chambre du second était un peu recourbée, et plongeait dans un mélange réfrigérant. La vapeur émise par l'eau liquide venait successivement se condenser en givre dans la partie refroidie : lorsqu'il ne restait plus de trace de liquide au-dessus du mercure, on constatait encore une dépression du sommet de la colonne, par rapport au niveau dans le baromètre sec.

Enfin l'évaluation précise des tensions de la vapeur d'eau aux températures supérieures à 100 degrés offre, au point de vue de la marche des machines à vapeur, le plus haut intérêt. — Elle a été faite d'abord par Dulong et Arago, puis par M. Regnault, aux travaux duquel nous empruntons les tableaux qui suivent. Outre l'intérêt scientifique que présente ce genre de recherches, elles ont fourni des nombres indiquant à quelle température doit être chauffée une chaudière, lorsqu'elle doit fournir de la vapeur ayant telle ou telle tension, déterminée par la nature de la machine qu'elle doit mettre en mouvement.

Les tableaux suivants contiennent quelques-uns des résultats relatifs à la force élastique maximum de la vapeur d'eau. Le premier donne les forces élastiques, de 10 en 10 degrés, depuis la température de —30° C. jusqu'à la température de + 100° C.; il est extrait d'un tableau plus complet, donné par M. Regnault, et donnant les forces élastiques de degré en degré. — Le second indique les températures auxquelles la force élastique devient égale à un nombre entier d'atmosphères, depuis 2 jusqu'à 30.

FORCE ÉLASTIQUE MAXIMUM DE LA VAPEUR D'EAU.

ENTRE —30° ET +100° :

Température.	Force élastique en millimèt.	Température.	Force élastique en millimèt.
—30°.	0mm,39	40°.	54mm,91
—20°.	0mm,93	50°.	91mm,98
—10°.	2mm,09	60°.	148mm,79
0°.	4mm,60	70°.	233mm,03
+10°.	9mm,16	80°.	354mm,64
20°.	17mm,39	90°.	525mm,45
30°.	31mm,58	100°.	760mm,00 (1atm.)

ENTRE 100° ET 236° :

Température.	Force élastique en atmosph.	Température.	Force élastique en atmosph.
100°.	1 atm.	153°.	5 atm.
121°.	2	181°.	10
135°.	3	215°.	20
145°.	4	236°.	30

ÉBULLITION ET ÉVAPORATION. — CONDENSATION DES VAPEURS ET DES GAZ.

130. **Distinction entre l'ébullition et l'évaporation.** — La conversion des liquides en vapeurs peut s'effectuer de deux manières différentes :

On nomme *ébullition* la production de vapeur dans toute la masse du liquide, sous forme de bulles qui grossissent à mesure qu'elles s'élèvent, et qui viennent crever à la surface : elle ne se manifeste, pour un même liquide et dans les mêmes conditions extérieures, qu'à une température déterminée.

On nomme *évaporation* la production insensible de vapeurs à la surface libre d'un liquide : elle se produit à des températures à peu près quelconques, et bien inférieures au point d'ébullition, ainsi que nous l'avons constaté pour l'eau.

131. **Lois de l'ébullition.** — Quand un liquide est porté jusqu'à la température à laquelle il entre en ébullition, un thermomètre plongé dans la masse permet de constater immédiatement les deux lois suivantes :

1° *Un même liquide, dans les mêmes conditions extérieures, entre toujours en ébullition à la même température.*

2° *Pendant tout le temps que dure l'ébullition, la température du liquide reste constante.*

La température d'ébullition varie d'ailleurs beaucoup, dans les mêmes conditions extérieures, d'un liquide à l'autre. — C'est ce que montre le tableau suivant :

POINTS D'ÉBULLITION DE QUELQUES LIQUIDES, SOUS LA PRESSION DE 760 MILLIMÈTRES.

Acide sulfureux	—8°	Acide nitrique ordinaire	123°
Éther ordinaire	+35°,5	Essence de térébenthine	161°
Alcool absolu	78°,5	Acide sulfurique	326°
Acide nitrique monohydraté	86°	Mercure	360°
Eau	100°	Soufre	440°

132. **Chaleur latente de vaporisation.** — Les deux lois précédentes, tout à fait semblables à celles de la fusion (119), conduisent aussi à des conclusions semblables. — En effet, la température d'un liquide restant constante pendant tout le temps que dure l'ébul-

lit on, toute la chaleur qui lui est fournie par le foyer est employée à le transformer en vapeur, *sans élever sa température*. Ici encore, on dit que cette chaleur devient *latente*, et on la nomme *chaleur latente de vaporisation*.

S'il y a absorption de chaleur latente de vaporisation par toute portion d'un liquide qui passe à l'état de vapeur, réciproquement, une vapeur qui se condense abandonne la chaleur latente qu'elle avait absorbée. — De là l'emploi de la vapeur d'eau, comme moyen de chauffage : un poids relativement faible de vapeur suffira pour échauffer une masse d'air ou d'eau assez considérable, puisqu'elle abandonnera, en se condensant, la chaleur latente qui la maintenait à l'état de vapeur, et, après sa condensation, la chaleur qui élevait sa température au-dessus de la température finale du mélange. — Nous reviendrons plus loin sur l'évaluation précise de ces quantités de chaleur.

133. **Variations de la température d'ébullition d'un liquide, avec la pression extérieure.** — Nous avons pris comme définition du 100e degré du thermomètre la température à laquelle l'eau entre en ébullition, dans un vase ouvert, et la pression atmosphérique étant de 760 millimètres : nous avons fait remarquer d'ailleurs (128) que, à cette même température, la force élastique de la vapeur est elle-même égale à 760 millimètres. Donc, dans ces circonstances, la température d'ébullition de l'eau est précisément celle à laquelle la force élastique de sa vapeur est égale à la pression extérieure. — C'est là un phénomène général : *un liquide quelconque entre en ébullition à la température pour laquelle la force élastique de sa vapeur est égale à la pression qui s'exerce à sa surface.*

Ce résultat s'explique facilement si l'on remarque qu'une bulle de vapeur, pour exister en un point d'une masse liquide, doit avoir une température au moins égale à celle qui lui donne une force élastique capable de vaincre les pressions qu'elle supporte. — Aussi, quand on échauffe une masse d'eau par la partie inférieure, comme on le fait d'ordinaire, ne voit-on jamais l'ébullition se déterminer franchement à la fois dans toute la masse : il se forme d'abord, dans les points les plus chauds, de petites bulles de vapeur qui commencent à s'élever, mais se condensent ensuite en arrivant dans des couches plus froides : de là un bruissement particulier, que l'on caractérise en disant que l'eau *chante*. C'est seulement quand le liquide tout entier a atteint la température de 100° que les bulles peuvent monter jusqu'à sa surface : et en effet, c'est dans ces conditions seulement qu'elles peuvent conserver une tension suffisante.

De ce qui vient d'être dit, il résulte que, toutes les autres conditions restant les mêmes, la température d'ébullition d'un liquide doit s'abaisser quand on diminue la pression qui s'exerce à sa surface, et s'élever, au

contraire, quand cette pression augmente. — C'est ce que confirment les expériences suivantes :

L'eau entre en ébullition, sous le récipient de la machine pneumatique, même *à la température ordinaire*, quand l'air est suffisamment raréfié : au moment où l'ébullition commence, le baromètre tronqué de la machine marque une pression égale à la tension de la vapeur d'eau correspondant à la température du liquide. L'ébullition s'arrête bientôt si l'on cesse de faire fonctionner la machine, parce que la force élastique de la vapeur déjà formée s'ajoute à celle de l'air restant. — Sur le sommet des hautes montagnes, la pression étant toujours beaucoup moindre que 760 millimètres, l'eau entre en ébullition à des températures bien inférieures à 100°. C'est ainsi que, sur le mont Blanc, l'eau bout à 84°.

Inversement, en comprimant de l'air dans les appareils où l'on échauffe certains liquides, on parvient, dans l'industrie, à retarder leur point d'ébullition de manière à leur faire conserver l'état liquide à des températures beaucoup plus élevées. — La *marmite de Papin* (*fig.* 91) permet de réaliser ces effets dans les laboratoires. Elle se compose d'un cylindre de bronze C, contenant de l'eau et fermé par un couvercle que maintient la vis V : ce couvercle est muni d'une soupape de sûreté, consistant en un petit ajutage *s*, sur lequel s'appuie un levier L ; ce levier est assujetti, d'un côté, dans des anneaux fixés au couvercle ; il porte, vers son autre extrémité, un poids P, dont on règle la position de manière qu'il soit soulevé si la vapeur atteint une tension trop considérable. L'ébullition est impossible dans cet appareil, tant que la soupape est fermée, parce que la pression de la vapeur qui se forme lentement au-dessus du liquide empêche toujours le dégagement des bulles dans la masse. Mais si l'on vient à soulever le

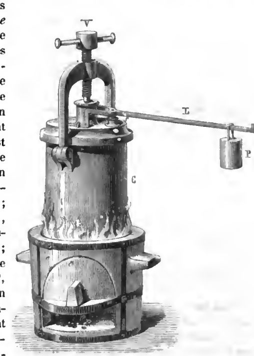


Fig. 91. — Marmite de Papin.

levier, la vapeur s'échappe en un jet de plusieurs mètres, et la plus grande partie du liquide est réduite en vapeur par une ébullition tumultueuse.

134. Circonstances accessoires, modifiant la température d'ébullition. — La *nature des parois* des vases qui contiennent les liquides influe d'une manière sensible sur la température d'ébullition. L'eau bout, dans un vase de verre, à une température un peu plus élevée que dans un vase métallique : le point d'ébullition s'élève même jusqu'à 108° si l'on a nettoyé avec soin l'intérieur de ces vases, par des lavages aux acides ; on observe alors que la vapeur se forme par grosses bulles, se détachant avec peine des parois, et produisant dans le liquide de violents soubresauts. — Les *aspérités* que présentent accidentellement les parois des vases favorisent, au contraire, le dégagement des bulles de vapeur, et régularisent l'ébullition : c'est souvent en ces points seulement que se dégage la vapeur, par filets de petites bulles qui montent vers la surface. — L'influence de ces diverses circonstances doit être attribuée à ce qu'elles font varier l'adhérence des parois pour les molécules liquides.

Une cause de variation plus importante est la présence de corps en dissolution, lorsque ces corps ne sont pas eux-mêmes volatils. Ainsi, une solution saturée de sel marin dans l'eau bout seulement à 108°; une solution saturée de salpêtre, à 116°. — Il y a ici intervention d'une force nouvelle, l'affinité chimique, qui s'ajoute à la cohésion, pour retarder le dégagement de la vapeur.

En tout cas, quel que soit le vase qui contient le liquide, et quelles que soient les substances en dissolution, la température de la *vapeur elle-même*, à quelque distance de la surface libre, est toujours la même, pourvu que la pression soit constante. — On conçoit ainsi pourquoi il est indispensable, dans la détermination du 100° degré des thermomètres (92), de placer le réservoir, non pas dans le liquide, mais dans la vapeur elle-même et à une petite distance de la surface. — Cette précaution doit être également observée quand on se propose d'obtenir la température exacte d'ébullition d'un liquide quelconque.

135. Évaporation. — Nous avons appelé *évaporation* la production insensible de vapeurs à la surface libre d'un liquide : quoiqu'elle soit d'autant plus abondante que la température du liquide est plus élevée, cependant elle a lieu à toute température. — L'expérience a montré que, toutes choses égales d'ailleurs, l'évaporation est aussi d'autant plus rapide que l'espace environnant est plus éloigné de la saturation; par suite, l'agitation de l'air à la surface d'un liquide tend à activer l'évaporation, en enlevant les couches saturées et les remplaçant par d'autres. Ainsi s'explique l'efficacité des courants d'air, pour sécher rapidement les étoffes humides : ainsi s'explique encore l'action de certains vents du

nord qui, même pendant l'hiver, sèchent plus vite la terre que ne font les chaleurs de l'été.

136. **Froid produit par l'évaporation.** — L'abaissement de température qu'on observe toujours quand un liquide s'évapore prouve qu'il y a ici, comme dans le phénomène de l'ébullition, absorption d'une certaine quantité de chaleur latente, laquelle est employée à effectuer la transformation d'une partie du liquide en vapeur : cette chaleur est, en général, empruntée au liquide lui-même et aux corps avec lesquels il est en contact; de là un refroidissement, parfois assez considérable.

Vient-on, par exemple, à environner de coton le réservoir d'un thermomètre, et à le mouiller avec de l'éther, on voit l'évaporation abaisser rapidement la température du thermomètre au-dessous de zéro.

L'évaporation rapide de l'eau, dans un milieu sans cesse raréfié, peut également abaisser sa température jusqu'à déterminer la congélation du liquide restant. Cette expérience, qui est due à Leslie, s'effectue en plaçant quelques gouttes d'eau dans une petite capsule de liége noircie A (*fig.* 92), au-dessus d'un vase V contenant de l'acide sulfurique, et sous le récipient de la machine pneumatique : on fait le vide aussi complétement que possible, et on ferme la clef de la machine. L'acide sulfurique continue d'absorber la vapeur d'eau à mesure qu'elle se produit, et concourt ainsi à activer l'évaporation : au bout de quelques minutes, on peut détacher de la capsule une petite lentille de glace.

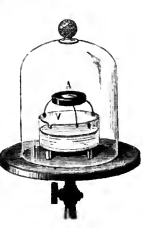


Fig. 92.

137. **Condensation des vapeurs et des gaz.** — Les vapeurs ne diffèrent des gaz proprement dits que par la facilité avec laquelle elles se liquéfient. Il suffit, en général, de les faire rendre dans des appareils convenablement refroidis pour les condenser, c'est-à-dire pour obtenir de nouveau le liquide qui les a formées. Nous décrirons quelques-uns de ces appareils en traitant de la distillation.

Les gaz proprement dits exigent, pour se liquéfier, l'intervention de moyens plus énergiques. On emploie, tantôt le refroidissement, tantôt la compression, tantôt enfin les deux actions à la fois. — On verra en chimie que l'acide sulfureux, par exemple, se liquéfie à — 8°, sans qu'il soit nécessaire de le comprimer (*Chimie*, fig. 88). Le chlore, le gaz ammoniac, l'acide sulfhydrique, peuvent être liquéfiés dans des tubes de verre très-résistants, où on laisse s'accumuler une grande quantité de gaz, de manière qu'il acquierre une tension suffisante pour se liquéfier (*Chimie*,

fig. 70); on entoure seulement de glace une des branches du tube, afin que la portion de gaz liquéfiée vienne s'y réunir. L'acide carbonique sera liquéfié par le même procédé, à la condition d'employer des appareils plus résistants, qui seront décrits dans la *Chimie;* avec ces appareils, on obtiendra même l'acide carbonique solidifié sous forme d'une neige blanche, à cause du froid produit par l'évaporation du liquide. — Enfin, M. Faraday a pu liquéfier un grand nombre d'autres gaz en les comprimant, à l'aide de pompes foulantes, dans des tubes à parois très-résistantes dont il abaissait la température : le mélange réfrigérant le plus efficace, pour ces expériences, est un mélange d'acide carbonique solide et d'éther.

On nomme ***gaz permanents*** ceux qui ont résisté jusqu'ici à toutes les tentatives faites pour les liquéfier. Ils ne sont plus qu'au nombre de six : l'hydrogène, l'azote, le protoxyde d'azote, l'oxygène, le bioxyde d'azote et l'hydrogène protocarboné (gaz des marais).

DISTILLATION. — ALAMBICS.

138. **Distillation.** — La distillation a pour but de purifier les substances volatiles, au moyen de l'ébullition et de la condensation ultérieure des vapeurs. — Pour que ce procédé soit applicable, il est nécessaire que le corps à distiller soit mélangé avec des substances fixes, ou au moins avec des substances dont le point d'ébullition soit plus élevé que le sien.

L'appareil distillatoire le plus simple consiste dans une cornue de verre dont on engage le col dans le goulot d'un ballon : on introduit le corps à distiller dans la cornue, et on la place sur un fourneau : le ballon est entouré d'eau froide ou de glace, et les vapeurs viennent s'y condenser. — On peut également faire passer les vapeurs dans un tube un peu long, environné d'un manchon que parcourt un courant d'eau froide (*Chimie*, fig. 44).

139. **Alambics.** — L'appareil employé le plus fréquemment pour distiller des quantités un peu considérables de liquides est l'***alambic*** (*fig.* 93). — A est une petite chaudière qu'on nomme la ***cucurbite***, et dans laquelle le liquide à distiller est introduit par l'ouverture *a;* B est une sorte de dôme qui communique librement avec la cucurbite, et qu'on nomme le ***chapiteau;*** C est un grand réservoir métallique ou ***condenseur*** au milieu duquel est un tube EE′ enroulé en spirale, qu'on nomme le ***serpentin***. La vapeur arrive dans ce tube, dont les parois sont en contact extérieurement avec l'eau froide que contient le réservoir ; le liquide provenant de la condensation s'écoule par l'extrémité O. — En se liquéfiant, la vapeur abandonne au condenseur sa chaleur latente (132) : la température de l'eau environnante s'élève donc rapidement, et il est essentiel de la renouveler. Pour cela, on a adapté sur le côté du réservoir un

tube à entonnoir FF′, qui amène au fond du vase l'eau froide fournie

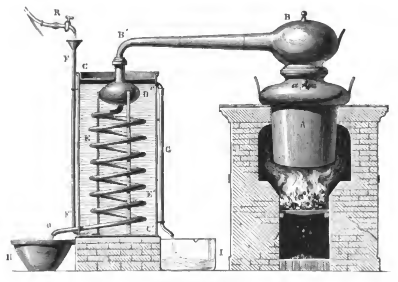


Fig. 93. — Alambic.

par un robinet R ; au contraire, l'eau qui s'échauffe gagne la partie supérieure, et s'écoule doucement par l'orifice *o* et le tube G.

CHAPITRE III.

Équilibre des fluides dont les diverses parties ne sont pas à la même température. — Tirage des cheminées.
Conductibilité des corps pour la chaleur. — Procédé d'Ingenhousz pour les corps solides.

ÉQUILIBRE DES FLUIDES DONT LES DIVERSES PARTIES NE SONT PAS A LA MÊME TEMPÉRATURE.

140. **Courants produits dans une masse fluide échauffée par la partie inférieure.** — Lorsqu'on chauffe un liquide par la partie inférieure, les portions qui reçoivent l'action de la chaleur se dilatent : leur densité diminuant, elles s'élèvent, et sont remplacées par d'autres qui s'échauffent à leur tour. Il s'établit ainsi des courants ascendants de liquide chaud et des courants descendants de liquide froid. — On peut rendre ces courants sensibles en échauffant, par la partie in-

térieure, une masse d'eau placée dans une cloche renversée (*fig.* 94) : si l'on a eu soin de mettre en suspension dans cette eau un peu de sciure de bois, on la voit former des courbes qui s'élèvent des point échauffés, au voisinage de l'axe de la cloche, et redescendent en suivant les parois. — Il ne pourrait y avoir équilibre que si les couches inégalement chaudes se superposaient par ordre de densité décroissante à partir du fond, ce qui est impossible avec la disposition actuelle.



Fig. 94.

141. Tirage des cheminées. — Les appareils employés pour le chauffage des appartements se composent toujours d'une partie intérieure à l'appartement, où s'effectue la combustion : c'est le *foyer ;* et d'une autre partie offrant un développement plus ou moins grand, par laquelle la fumée et les produits de la combustion sont rejetés dans l'atmosphère : c'est la *cheminée.* — Pour qu'une cheminée fonctionne bien, il faut qu'elle emporte intégralement tous les produits de la combustion, et que ce mouvement même détermine l'appel d'une quantité d'air au moins égale à celle qui est nécessaire à la combustion ; cet appel est ce qu'on nomme le *tirage.*

Le tirage d'une cheminée *augmente avec sa hauteur,* pourvu que celle-ci ne soit pas trop considérable : en effet, le tirage est déterminé par la différence entre la pression de l'air de l'appartement et la pression des gaz chauds que contient la cheminée, lesquels ont une densité moindre : la différence est d'autant plus grande que la cheminée est plus élevée. — Cependant, la hauteur de la cheminée ne doit pas être augmentée au delà d'une certaine limite ; car les gaz, se refroidissant à mesure qu'ils s'élèvent, pourraient perdre leur force ascensionnelle avant d'atteindre l'orifice supérieur : ils ne feraient alors que ralentir le tirage, à cause des frottements qu'ils éprouvent contre les parois.

Une cheminée trop large tire mal et *fume :* en effet, l'air qu'elle contient s'échauffe peu, et il s'établit, avec les courants ascendants de gaz chauds, des courants descendants d'air froid, qui font refluer une partie de la fumée.

Une cheminée fume encore lorsque l'appartement où elle est située est clos trop hermétiquement : l'air extérieur ne pouvant plus arriver, il se produit une raréfaction dans l'appartement lui-même ; la colonne gazeuse cesse de monter régulièrement, ou même elle redescend.

Il est facile de concevoir, d'après ce qui précède, que si deux pièces, contenant chacune une cheminée, communiquent ensemble, le tirage de l'une des cheminées devra faire fumer l'autre.

Un vent violent, en empêchant les gaz chauds de sortir, ou même en les refoulant, s'il a une direction descendante, rabat également la fumée dans les appartements. — C'est pour éviter ces effets que l'on coiffe les cheminées, à leur partie supérieure, de *mitres* en tôle ou en poterie.

CONDUCTIBILITÉ.

142. **Définitions.** — On nomme *conductibilité* la propriété que possèdent les corps de transmettre la chaleur de proche en proche, dans l'intérieur de leur masse.

Les divers corps sont doués de cette propriété à des degrés très-différents. Tout le monde sait, par exemple, qu'une cueiller métallique, plongée par l'une de ses extrémités dans un liquide chaud, s'échauffe à son autre extrémité, et que cet échauffement est assez considérable pour qu'il soit bientôt impossible de la tenir avec les doigts ; au contraire, une allumette enflammée peut être tenue à la main, sans qu'on constate même d'élévation de température. — On appelle, d'une manière générale, *bons conducteurs* les corps dans lesquels la chaleur se propage facilement de proche en proche; *mauvais conducteurs*, ceux dans lesquels elle se propage difficilement. Ces expressions n'ont cependant rien d'absolu, en sorte qu'on peut trouver, entre ces deux groupes de corps, tous les intermédiaires.

143. **Procédé d'Ingenhousz, pour étudier la conductibilité des corps solides.** — L'appareil d'Ingenhousz se compose d'une petite cuve rectangulaire de laiton (*fig.* 95), dont l'une des faces verticales reçoit les extrémités de tiges de diverses substances, mais de même diamètre : or, argent, cuivre, laiton, zinc, étain, verre, bois, par exemple. Ces tiges ont été couvertes d'une couche mince de cire : pour cela, on les a plongées dans un bain de cire fondue, et on les a laissées refroidir après les en avoir retirées.

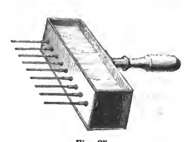


Fig. 95.

— Pour faire une expérience, on verse de l'eau bouillante dans la caisse; la chaleur se transmet dans la longueur des tiges, et détermine la fusion de la cire, à des distances variables de l'extrémité échauffée. On voit donc que l'on peut ainsi juger comparativement du plus ou moins de conductibilité de ces diverses substances, par la distance à laquelle se propage, dans un même intervalle de temps, une élévation de température déterminée, celle du point de fusion de la cire employée.

En variant ces expériences avec différents corps, on classe les corps

solides les plus usuels, sous le rapport de leur conductibilité, dans l'ordre suivant :

Argent.	Fer.	Verre.
Cuivre.	Acier.	Marbre.
Or.	Plomb.	Porcelaine.
Laiton.	Platine.	Poterie.
Zinc.	Bismuth.	Charbon.
Etain.	—	Bois.

144. **Conductibilité des liquides et des gaz.** — Pour étudier la conductibilité des liquides et des gaz, il est indispensable d'avoir recours à des précautions particulières, qui rendent cette étude très-délicate. — En effet, si l'on échauffe un liquide ou un gaz par sa partie inférieure, comme on le fait d'ordinaire, nous avons vu qu'il se produit toujours des courants qui mélangent successivement les diverses couches entre elles (140) : il serait donc impossible d'étudier ainsi l'influence de la conductibilité. Les mêmes phénomènes auraient lieu pour un gaz dans des conditions analogues.

En échauffant les masses liquides ou gazeuses par leur partie supérieure, afin que les couches soient disposées d'elles-mêmes par ordre de densités croissantes à partir du haut, et, prenant cependant encore toutes les précautions pour empêcher la production de courants dans leur intérieur, on a pu étudier la conductibilité de ces corps. — On a constaté ainsi que la faculté conductrice des liquides est extrêmement faible : en échauffant, par la partie supérieure, de l'eau placée dans un vase où sa hauteur est de quelques décimètres, on peut amener les couches voisines de la surface supérieures à 100 degrés, sans que le thermomètre indique, dans les couches profondes, une élévation sensible de température.

Les gaz sont encore plus mauvais conducteurs que les liquides. C'est là ce qui explique l'emploi des fourrures, des étoffes ouatés, de la laine, comme vêtements pour l'hiver : les filaments dont ils sont formés emprisonnent dans leurs interstices une couche épaisse d'air, dont ils gênent les mouvements, et qui ne conduit que très-difficilement la chaleur.

CHAPITRE IV.

Détermination de la chaleur spécifique des corps solides et liquides, par la méthode des mélanges. — Chaleurs latentes.

DÉTERMINATION DES CHALEURS SPÉCIFIQUES.

145. **Définitions.** — La chaleur peut produire sur les corps, comme on l'a vu, deux effets différents : une élévation de température, apprécia-

ble au thermomètre; des changements d'état, caractérisés par une absorption de chaleur sans variation de température. — Mais l'expérience montre que, pour produire une *même élévation de température* sur des poids égaux de différents corps, il faut leur fournir des quantités de chaleur différentes. De même, pour faire éprouver un *même changement d'état* à des poids égaux de différents corps, il faut aussi leur fournir des quantités de chaleur différentes.

On prend comme unité, dans la mesure des quantités de chaleur, la *calorie*, c'est-à-dire *la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1 kilogramme d'eau.*

On nomme *chaleur spécifique* d'un corps *le nombre de calories nécessaires pour élever de 1 degré la température de 1 kilogramme de ce corps.*

On nomme *chaleur latente de fusion* d'un corps solide *le nombre de calories qu'absorbe 1 kilogramme de ce corps pour se fondre, sans élévation de température;* — *chaleur latente de vaporisation* d'un liquide, *le nombre de calories qu'absorbe 1 kilogramme de ce liquide pour se transformer en vapeur saturante, sans élévation de température.*

146. **Détermination de la chaleur spécifique des corps solides et liquides, par la méthode des mélanges.** — La méthode des mélanges, pour la mesure des chaleurs spécifiques, consiste essentiellement dans la série des opérations suivantes. On chauffe, à une température connue T, un poids déterminé P du corps soumis à l'expérience; on le plonge ensuite dans une masse d'eau dont on connaît également le poids M et la température t. Le corps se refroidit en cédant à l'eau une partie de sa chaleur, en sorte que l'eau s'échauffe : quand l'équilibre est établi, on note la température θ du mélange. — Il suffit ensuite d'exprimer que la quantité de chaleur perdue par le corps est égale à la quantité de chaleur gagnée par l'eau, pour obtenir une équation où la seule inconnue est la chaleur spécifique cherchée.

En effet, soit x la chaleur spécifique inconnue, c'est-à-dire le nombre de calories nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1 kilogramme de ce corps : le poids P, en s'abaissant de 1 degré, perdrait Px; et, puisqu'il s'est abaissé de $(T-\theta)$ degrés, il a perdu $Px(T-\theta)$. D'autre part, d'après la définition même de la calorie, le poids M d'eau absorberait, pour s'élever de 1 degré, M calories; et pour s'élever de $(\theta-t)$ degrés, il en a absorbé $M(\theta-t)$. En égalant ces quantités de chaleur, on a donc

$$(1) \qquad Px(T-\theta) = M(\theta-t)$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{M(\theta-t)}{T-\theta}.$$

Toutefois, en opérant ainsi, on ne tiendrait compte, ni de l'influence du vase dans lequel est placée l'eau et qui absorbe également de la chaleur.

ni de celle de l'enveloppe dans laquelle peut être contenu le corps soumis à l'expérience, et qui abandonne aussi de la chaleur à l'eau. — Pour obtenir des résultats précis, il sera donc nécessaire d'introduire, dans l'équation (1), quelques ***termes de correction.***

Et d'abord, pour donner à ces termes de correction, dont nous allons tenir compte, une valeur aussi petite que possible, on place l'eau qui doit servir à l'expérience dans un vase V (*fig.* **96**) en laiton très-mince. Ce vase, qu'on appelle le ***calorimètre***, repose sur des fils de soie croisés, supportés par trois montants de bois a : les fils de soie, qui sont très-mauvais conducteurs, n'enlèvent au laiton que des quantités de chaleur tout à fait insensibles. Un thermomètre K, à très-petit réservoir, donne la température du liquide aux divers instants. Avec ces dispositions, les corps qui participent au réchauffement de l'eau n'ont qu'une masse peu considérable. — Quant au corps sur lequel on opère, si c'est un corps solide, on le place en fragments dans une petite corbeille en fils de laiton très-fins; s'il s'agissait d'un liquide, ou d'un corps solide que l'eau pût dissoudre, on le mettrait dans une petite fiole aussi mince que possible. — Après avoir laissé le corps et son enveloppe, pendant un temps suffisant, dans une étuve, où toutes les précautions sont prises pour que la température soit bien constante et parfaitement connue, on les descend, au moyen d'un fil de soie, au milieu du calorimètre : on agite pour déterminer le mélange des couches liquides, et on note la température à laquelle s'élève le thermomètre.

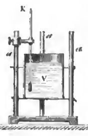


Fig. 96.

Soit maintenant p le poids du calorimètre de laiton, p_1 le poids de la corbeille de laiton qui contient le corps; soit c la chaleur spécifique du laiton, que nous supposerons également connue. — En raisonnant comme plus haut, on voit que la quantité de chaleur perdue par l'enveloppe du corps est $p_1 c(T-\theta)$; que la quantité de chaleur gagnée par le métal du calorimètre est $pc(\theta - t)$. En introduisant ces termes dans l'équation (1), on obtient :

$$(2) \qquad Px(T-\theta) + p_1 c(T-\theta) = M(\theta - t) + pc(\theta - t)$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{(M+pc)(\theta - t) - p_1 c(T-\theta)}{P(T-\theta)}.$$

Pour abréger le langage, on désigne quelquefois la quantité pc, c'est-à-dire le produit du poids du calorimètre par sa chaleur spécifique, sous le nom de ***valeur du calorimètre transformé en eau;*** on voit en effet qu'un poids d'eau égal au produit pc absorberait, en s'échauffant de

$(\theta - t)$ degrés, la quantité de chaleur $pc\,(\theta - t)$ qu'absorbe le métal du calorimètre lui-même.

Remarque. — Nous avons supposé connue la chaleur spécifique c du laiton qui forme le calorimètre et l'enveloppe du corps. Cette donnée est facile à obtenir par une expérience préliminaire : en effet, appliquons la méthode en prenant, comme corps soumis à l'expérience, un certain poids P′ de ce même laiton : soient M′, T′ t', θ' les données de cette expérience correspondantes à M, T, t et θ, on aura l'équation

$$P'c\,(T' - \theta') + p_1 c\,(T' - \theta') = M'(\theta' - t') + pc\,(\theta' - t')$$

d'où l'on tirera

$$c = \frac{M'(\theta' - t')}{(P' + p_1)(T' - \theta') - p\,(\theta' - t')}.$$

CHALEUR SPÉCIFIQUE DE QUELQUES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES.

Eau	1,000	Zinc	0,096
Essence de térébenthine	0,426	Cuivre	0,095
Charbon de bois	0,242	Laiton	0,094
Soufre	0,202	Argent	0,057
Verre	0,198	Étain	0,056
Diamant	0,147	Mercure	0,033
Fonte blanche	0,130	Or	0,032
Acier	0,118	Platine	0,032
Fer	0,114	Plomb	0,031

DÉTERMINATION DES CHALEURS LATENTES.

147. Détermination de la chaleur latente de fusion de la glace, par la méthode des mélanges. — La méthode des mélanges a été appliquée par MM. de la Provostaye et P. Desains, à la détermination de la chaleur latente de fusion de la glace. — Dans un calorimètre semblable au précédent (*fig.* 96), et ayant un poids p, on place un poids connu M d'eau, à une température t notablement supérieure à zéro. On y plonge un morceau de glace à zéro, qu'on a eu soin d'essuyer avec du papier buvard : on agite le liquide, et on note la température finale θ du mélange. Quant au poids de la glace introduite, il serait évidemment impossible de l'obtenir par une pesée préalable, pendant laquelle une partie se fondrait; on le détermine en pesant le calorimètre avant et après l'expérience : soit P ce poids. — Exprimons que la quantité de chaleur employée pour fondre la glace, et pour élever l'eau de fusion jusqu'à la température du mélange, est égale à celle qu'ont abandonnée l'eau placée dans le calorimètre et le calorimètre lui-même.

Soit x la chaleur latente de fusion de la glace, c'est-à-dire le nombre de calories qu'absorbe un kilogramme de glace à zéro pour se fondre,

sans élévation de température : le poids P de glace a absorbé, pour se fondre, P x calories ; l'eau de fusion a pris encore, pour s'échauffer de zéro à θ degrés, une quantité de chaleur égale à P θ. D'autre part, l'eau placée dans le calorimètre et le calorimètre lui-même ont perdu respectivement M $(t-\theta)$ et $pc\,(t-\theta)$. On a donc l'équation

$$Px + P\theta = (M + pc)\,(t-\theta)$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{(M+pc)\,(t-\theta) - P\theta}{P}$$

Par cette méthode, on trouve, pour chaleur latente de fusion de la glace, le nombre 79,25. — On voit qu'un kilogramme de glace absorbe, pour se fondre, sans changer de température, autant de chaleur qu'il en faudrait pour échauffer d'un degré 79kil.,25 d'eau.

148. **Chaleur latente de vaporisation de l'eau.** — Le procédé employé par Despretz pour déterminer la chaleur latente de la vapeur d'eau est encore une application de la méthode des mélanges. — Une cornue de verre, contenant de l'eau en ébullition, est mise en communication, par le tube t, avec un serpentin $s\,s$ (*fig.* 97) placé au milieu d'un calorimètre de cuivre, et environné d'eau froide; la partie inférieure de ce serpentin vient déboucher dans une boîte métallique $b\,b'$: l'eau condensée se réunit dans cette boîte, et prend la température de l'eau du calorimètre. Lorsqu'on en a laissé marcher l'opération pendant un temps suffisant, on note la température finale du calorimètre ; on recueille l'eau condensée, en ouvrant le robinet inférieur r, et on la pèse.

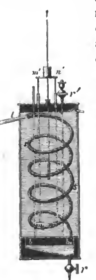


Fig. 97.

Soit p le poids du cuivre qui forme le calorimètre et le serpentin, c sa chaleur spécifique ; M le poids d'eau froide qu'on a placé dans l'appareil au commencement de l'expérience, t la température initiale ; T la température de la vapeur, P le poids de l'eau condensée, θ la température finale, et x la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En exprimant que la quantité de chaleur cédée par la vapeur en se condensant, et par l'eau condensée en se refroidissant jusqu'à θ, est égale à la quantité de chaleur gagnée par l'eau et par le calorimètre, on a l'équation

$$Px + P\,(T-\theta) = (M + pc)\,(\theta - t)$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{(M+pc)\,(\theta-t) - P\,(T-\theta)}{P.}$$

En opérant ainsi, on trouve que la chaleur latente de vaporisation de l'eau, quand l'ébullition se fait à 100 degrés, c'est-à-dire sous la pression de 760 millimètres de mercure, est égale à 537 calories. — Il faut donc, pour faire passer à l'état de vapeur 1 kilogramme d'eau dont la température est déjà 100°, autant de chaleur qu'il en faudrait pour échauffer d'un degré 537 kilogrammes d'eau froide.

CHAPITRE V.

Mélange des gaz et des vapeurs. — Hygromètre à cheveu. — Pluie, neige. — Distribution de la température à la surface du globe. — Influence de la latitude, de l'altitude, du voisinage des mers. — Vents réguliers.

MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS.

149. **La force élastique d'une vapeur, dans un espace occupé par un gaz, est égale à celle qu'elle aurait dans le vide, à la même température.** — Cette loi peut être vérifiée à l'aide de l'appareil suivant, dû à Gay-Lussac. Deux tubes de verre A et B (*fig.* 98), de diamètres très-inégaux, sont mis en communication, à leur partie inférieure, par une monture métallique D; B est ouvert à sa partie supérieure, A est mastiqué dans une monture C garnie d'un robinet *r*. — Les deux branches A et B ayant été d'abord remplies de mercure jusqu'au niveau de *r*, on visse au-dessus de ce robinet un ballon M, garni lui-même d'un robinet *r'*, et contenant de l'air sec ou un gaz sec quelconque. On ouvre *r* et *r'*, et on laisse écouler du mercure par le robinet inférieur *r''*: une partie du gaz passe alors dans le tube A, et, comme sa force élastique décroît, le mercure descend dans la branche B plus bas que dans la branche A. On ferme alors les robi-

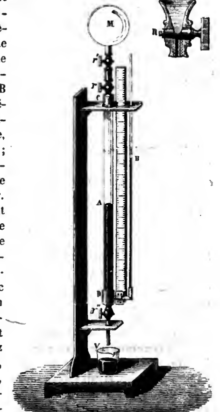


Fig. 98. — Appareil de Gay-Lussac.

nets, on détache le ballon M, et on ramène le gaz à la pression atmosphérique, en versant du mercure en B jusqu'à ce que le niveau du liquide dans les deux tubes soit dans le même plan horizontal : on note le volume V du gaz au moyen de la graduation. Cela fait, on adapte au-dessus de *r* un robinet particulier (figuré à part et à une échelle plus grande, en R) : ce robinet n'est percé qu'à demi, en sorte que, si l'on verse une certaine quantité de liquide dans l'entonnoir qui le surmonte, et qu'on le fasse tourner sur lui-même un certain nombre de fois, il introduit à chaque fois, au-dessous de lui, la quantité de liquide qui remplit sa cavité. Le liquide, en parvenant en A, se vaporise, et, quand l'espace est saturé, on verse du mercure en B, de manière que le volume du mélange redevienne V. L'observation montre alors que la différence des niveaux, due à la force élastique de la vapeur, est précisément ***égale à la force élastique de cette même vapeur dans le vide, à la même température.***

La même loi peut s'énoncer encore en disant que ***la force élastique d'un mélange de gaz et de vapeur est égale à la somme des forces élastiques que chacun d'eux posséderait, s'il occupait seul le volume total du mélange.*** — On peut remarquer que l'énoncé de cette loi est identique à celui de la loi sur laquelle nous nous sommes appuyés pour résoudre les problèmes relatifs aux mélanges des gaz (68).

HYGROMÉTRIE.

150. **Définitions.** — On nomme ***état hygrométrique*** de l'air, ou ***fraction de saturation***, à un moment déterminé, ***le rapport entre la tension actuelle de la vapeur et la tension maximum à la même température.*** Si l'on désigne par f la force élastique de la vapeur d'eau dans l'air à un instant donné, par F la force élastique maximum à la même température, l'état hygrométrique sera le quotient $\frac{f}{F}$. — C'est ce rapport qu'il importe de connaître, bien plutôt que la tension même de la vapeur d'eau dans l'air, au moment considéré, pour savoir si la vapeur est voisine ou non de son point de liquéfaction, c'est-à-dire si l'air est ***humide*** ou ***sec.***

Les ***hygromètres*** sont des instruments destinés à fournir, à chaque instant, la valeur de l'état hygrométrique.

151. **Hygromètre à cheveu.** — Tout le monde connaît ces petits instruments, d'une construction grossière, qui servent à prévoir la pluie ou le beau temps, et qui représentent, tantôt un moine dont le capuchon vient abriter la tête quand le temps est à la pluie, tantôt d'autres figurines effectuant tel ou tel mouvement en rapport avec l'état de l'atmosphère. Dans tous, le mouvement de la pièce mobile est produit par

une corde à boyau, qui se détord plus ou moins selon qu'elle est plus ou moins humide. — La plupart des substances organiques ont la propriété d'absorber d'autant mieux l'humidité de l'air et de s'allonger d'autant plus que la vapeur d'eau est plus voisine de la saturation : d'après cette remarque, H. B. de Saussure a construit un hygromètre où l'état hygrométrique de l'air est accusé par les variations de longueur d'un cheveu assujetti d'une manière convenable.

Le cheveu est fixé en A (*fig.* 99), à une pièce située derrière le cadre métallique de l'appareil : en B, il vient s'attacher sur l'une des gorges d'une double poulie, qui porte une aiguille légère C, parcourant un cadran divisé MM'. Sur l'autre gorge de la poulie s'enroule, dans le même sens, un fil de soie tendu par un petit poids *s*. Le cheveu a été débarrassé de la matière grasse dont il était enduit, par une immersion d'une demi-heure dans de l'eau bouillante renfermant environ un centième de carbonate de soude : il a été ensuite lavé à l'eau pure, et séché.

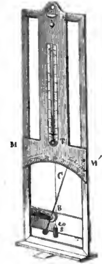


Fig. 99.
Hygromètre à cheveu.

Pour graduer l'instrument, on détermine d'abord deux points fixes : 1° le centième degré, ou point d'***humidité extrême;*** c'est le point où s'arrête l'aiguille quand l'appareil a séjourné quelque temps dans un vase contenant une petite couche d'eau à sa partie inférieure, et dont les parois elles-mêmes ont été mouillées; 2° le zéro, ou point de ***sécheresse extrême;*** c'est le point que marque l'aiguille dans un vase contenant de l'acide sulfurique, qui absorbe l'humidité de l'air. — L'espace compris entre ces deux points est ensuite divisé en 100 parties égales, qui sont les ***degrés*** de l'hygromètre.

Cette graduation ne suffit évidemment pas pour faire connaître immédiatement l'état hygrométrique des milieux où l'instrument se trouvera placé : et, par exemple, quand l'hygromètre marquera 50°, il n'en résultera nullement que l'état hygrométrique doive être égal à 0,50 ou $\frac{1}{2}$. — Gay-Lussac a employé, pour construire une table fournissant les valeurs de l'état hygrométrique qui correspondent aux degrés de l'instrument, la méthode suivante. Après avoir préparé un certain nombre de mélanges d'acide sulfurique et d'eau, dans des proportions diverses, il mesurait la tension de la vapeur émise par chacun de ces mélanges, en les introduisant dans des tubes barométriques disposés comme ceux de la figure 87 : L'expérience montre que cette tension est toujours moindre que celle de la vapeur émise par l'eau pure, à la même température, et d'autant

moindre que l'acide sulfurique est en plus forte proportion. L'hygromètre fut ensuite introduit successivement dans des vases contenant à leur partie inférieure une petite couche de chacun de ces mélanges : on notait avec soin les degrés marqués par l'aiguille et la température ambiante. Or, dans chaque cas on connaissait, comme nous venons de l'indiquer, la tension actuelle de la vapeur f, et les tables construites pour la vapeur d'eau (page 100) donnaient la tension maximum F correspondante à la même température : on pouvait donc calculer la valeur du quotient $\frac{f}{F}$ qu'il convenait d'inscrire en face du degré marqué par l'aiguille. — C'est ainsi qu'on a pu construire une table dont nous avons extrait les résultats suivants :

Degrés de l'hygromètre.	États hygrométriques.	Degrés de l'hygromètre.	États hygrométriques.
0.	0,000	60.	0,363
10.	0,046	70.	0,472
20.	0,094	80.	0,612
30.	0,148	90.	0,791
40.	0,208	100.	1,000
50.	0,278		

On voit, par cette table, que l'état hygrométrique correspondant au 50e degré, bien loin d'être exactement 0,50, est seulement égal à environ 0,29 : ces expériences sont donc absolument indispensables pour arriver à la connaissance de l'état hygrométrique, par les indications de l'instrument de ce genre.

152. **Problème.** — *Étant donné l'état hygrométrique* m *de l'air, à un moment déterminé, et la température* t, *calculer le poids de vapeur d'eau contenu dans un mètre cube d'air. — On sait que la densité de la vapeur d'eau, par rapport à l'air, est* 0,622.

L'état hygrométrique donné m représente le rapport $\frac{f}{F}$ de la force élastique actuelle de la vapeur d'eau à la force élastique maximum, pour la même température t ; or les tables de tension font connaître la force élastique maximum F pour la température t ; donc f est connu, puisqu'on a $f=mF$. — Pour avoir le poids d'un mètre cube de vapeur d'eau, sous la pression f et à la température t, nous raisonnerons comme s'il s'agissait d'un gaz, et nous chercherons d'abord le poids du même volume d'air, dans les mêmes conditions de pression et de température. Or le poids d'un litre d'air à 0° et sous la pression de 760 millimètres étant 1gr,293, le poids d'un mètre cube serait 1293 grammes; par suite, le poids d'un mètre cube d'air, sous la pression f et la température t, est

$$1293^{gr} \cdot \frac{f}{760} \cdot \frac{1}{1+\alpha t}.$$

D'autre part, la densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air étant 0,622, on aura le poids d'un mètre cube de vapeur dans les conditions données, en multipliant le poids de l'air par 0,622. Donc, en remplaçant f par mF, et α par sa valeur connue 0,00367, il vient

$$p = 1293^{gr}.\frac{mF}{760}.\frac{1}{1+0,00367\,t}.0,622.$$

153. Brouillards et nuages. — Les *brouillards* sont produits par de petites gouttelettes d'eau, qui proviennent de la condensation de la vapeur au milieu de l'air, et qui en altèrent plus ou moins la transparence. — Les *nuages* ne sont que des brouillards occupant les régions élevées de l'atmosphère : c'est ce que l'on constate lorsqu'on traverse les régions occupées par les nuages, soit en gravissant les flancs des montagnes, soit dans les ascensions aérostatiques.

Les causes de production des brouillards et des nuages sont très-multiples : ils se produisent, par exemple, quand un vent tiède et humide vient à souffler sur des points du globe qui sont à une température plus basse. — Il est bon de remarquer, d'ailleurs, que le mélange de deux masses d'air non saturées, mais voisines de leur point de saturation, et à des températures différentes, peut donner lieu à la condensation d'une partie de la vapeur qu'elles contiennent. Ainsi, par exemple, un mètre cube d'air, à 15° et à peu près saturé de vapeur, contient, comme il est facile de le calculer, 13 grammes de vapeur d'eau : un mètre cube à 25° en contient 22gr,5. Le mélange contiendrait donc 35gr,5, ou 17gr,35 de vapeur d'eau par mètre cube; or la température du mélange est voisine de 20°, et, à cette température, on trouve qu'un mètre cube d'air saturé ne peut contenir plus de 17gr,1 de vapeur : il y aura donc condensation, c'est-à-dire formation d'un brouillard.

154. Pluie, neige, grêle. — Quand les gouttelettes d'eau qui forment les nuages acquièrent un volume suffisant, elles tombent par leur propre poids et forment la *pluie*.

La *neige* est de la vapeur d'eau solidifiée dans les hautes régions de

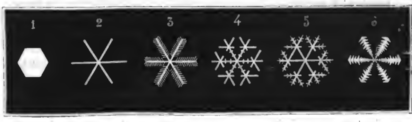


Fig. 100.

l'atmosphère. Chaque flocon est formé par la réunion de petites aiguilles

prismatiques de glace, groupées le plus souvent en étoiles très-régulières (*fig.* 100). — Quand la neige traverse, en tombant, des régions de l'atmosphère où la température est supérieure à zéro, elle peut se résoudre en pluie.

La formation de la *grêle* doit être rattachée aux phénomènes électriques qui s'accomplissent dans l'atmosphère pendant les pluies d'orage ; toutefois, les particularités du phénomène ne sont pas encore suffisamment expliquées. — Les *grêlons* sont le plus souvent de forme sphéroïdale ou ovoïde : ils sont formés d'un noyau blanc et opaque, environné de couches plus transparentes — La chute de la grêle, qui dure ordinairement à peine un quart d'heure, est toujours accompagnée d'un bruit particulier qui se produit dans les nuages, ce bruit est attribué à la rencontre des grêlons qui s'entre-choquent.

DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE A LA SURFACE DU GLOBE.

155. **Températures moyennes.** — La température moyenne d'*un jour*, en un lieu déterminé, est la moyenne des températures observées dans ce lieu, d'heure en heure, de minuit à minuit. L'expérience a montré que la moyenne de ces vingt-quatre observations diffère peu de la moyenne de trois observations faites, la première au lever du soleil, la seconde à midi, la troisième au coucher du soleil. — La température moyenne *d'un mois* est la moyenne des températures de tous les jours de ce mois. — La température moyenne *d'une année* est la moyenne des températures des mois de cette année.

La *température moyenne d'un lieu* est la moyenne des températures d'un grand nombre d'années. — Pour obtenir une moyenne ayant quelque constance, l'expérience a montré qu'il faut au moins dix années d'observations consécutives. — La température moyenne de Paris, fournie par trente années d'observation, est de 10°,8.

156. **Lignes isothermes, isothères et isochimènes.** — Pour représenter aux yeux, d'une manière sensible, la distribution des températures moyennes à la surface du globe, on a construit sur la sphère les trois systèmes de lignes suivants, dont l'idée première est due à M. de Humboldt.

1° *Lignes isothermes* (ἴσος, égal, θέρμη, chaleur), qui réunissent tous les points ayant la même température moyenne de l'année.

2° *Lignes isothères* (ἴσος, égal, θέρος, été), qui réunissent les points ayant la même température moyenne des trois mois de l'été (juin, juillet, août).

3° *Lignes isochimènes* (ἴσος, égal, χειμών, hiver), qui réunissent les points ayant la même température moyenne des trois mois de l'hiver (décembre, janvier, février).

157. **Climats**. — On nomme *climat* d'un lieu l'ensemble des conditions météorologiques auxquelles il est soumis dans l'espace d'une année. — Au point de vue des conditions de température, il est facile de voir que la considération *simultanée* des trois espèces de lignes précédentes fournira des résultats précieux sur les climats des divers points. Si l'on sait, par exemple, qu'un point du globe est traversé par la ligne isotherme de 10°, on connaîtra sa température moyenne annuelle : mais cette seule donnée ne fournirait pas une notion suffisante sur son climat, car cette moyenne peut résulter, soit d'une série de jours très-chauds suivis de jours très-froids, soit d'une succession de températures peu différentes de 10 degrés pendant toute l'année. Mais si l'on sait que tel point situé sur la ligne isotherme de 10 degrés est en même temps sur la ligne isothère de + 25°, et dans le voisinage de la ligne isochimène de — 5°, on saura, par là même, que la température de l'été y est très-élevée, et la température de l'hiver très-basse ; si, au contraire, telle autre région, située sur la même ligne isotherme, est traversée par la ligne isothère de + 15°, et par la ligne isochimène de + 5°, elle présente, dans le cours de l'année, une température beaucoup plus uniforme et un climat tout différent. — Ces différences ont, par exemple, au point de vue des conditions hygiéniques et de la végétation, une extrême importance.

On distingue généralement trois espèces de climats :

1° *Climats constants*, pour lesquels la température moyenne de l'été ne présente avec celle de l'hiver qu'une différence de 6 à 7 degrés.

2° *Climats tempérés*, pour lesquels la température moyenne de l'été offre, avec celle de l'hiver, une différence d'une quinzaine de degrés.

3° *Climats excessifs*, pour lesquels la différence des températures moyennes de l'été et de l'hiver est beaucoup plus considérable.

158. **Influence de la latitude.** — Les points du globe qui sont situés à des latitudes différentes présentent, par cela même, des différences quant aux durées relatives du jour et de la nuit à une même époque de l'année : le temps pendant lequel le soleil les échauffe, et le temps pendant lequel ils se refroidissent sont donc variables. La hauteur à laquelle le soleil s'élève au-dessus de l'horizon varie également, et c'est là encore une cause d'inégalité dans la température. — On s'explique ainsi le partage du globe en cinq grandes zones, dont les limites géographiques sont les suivantes :

1° La *zone torride*, limitée par les deux tropiques, c'est-à-dire par les deux parallèles qui sont situées, de part et d'autre de l'équateur, à la latitude de 23° 28′. — Cette zone est caractérisée par un *climat très-constant* et par une *température moyenne annuelle très-haute*.

2° Les deux *zones tempérées*, situées de part et d'autre de la zone torride : chacune d'elles est limitée, d'une part par les tropiques, de l'autre par le cercle polaire, c'est-à-dire par le parallèle qui est situé à 23° 28′

du pôle (latitude 66° 32'). — Dans chaque zone tempérée, à mesure qu'on s'éloigne du tropique, le climat, d'abord *tempéré*, tend à devenir *excessif*, et la température moyenne annuelle devient *de plus en plus basse*.

3° Les deux *zones glaciales*, comprises chacune entre l'un des cercles polaires et le pôle correspondant. — La température, extrêmement basse pendant des nuits dont la longueur devient de plusieurs mois, ne peut atteindre qu'une moyenne très-peu élevée pendant les longs jours, à cause de la grande obliquité des rayons solaires. Aussi ces zones sont-elles caractérisées par une température moyenne très-basse : ce sont les régions des *glaces perpétuelles*, dont les limites varient peu avec les saisons.

159. **Influence du voisinage des mers.** — Le voisinage des mers tend à rendre les climats des côtes moins variables, à la même latitude, que ceux des continents. — Cette influence s'explique si l'on remarque que les eaux s'échauffent et se refroidissent beaucoup plus lentement que la terre ferme. — En outre, l'abondance de la vapeur d'eau, qui produit souvent des nuages près des côtes, tempère l'ardeur du soleil pendant le jour, et diminue aussi la perte de chaleur que la terre elle-même éprouve, par rayonnement, pendant la nuit.

Aussi les *climats maritimes* doivent-ils être placés le plus ordinairement parmi les climats tempérés, et souvent même parmi les climats constants ; au contraire, les *climats continentaux* peuvent être, sous la même latitude, des climats excessifs. — Parmi les climats maritimes, les plus constants sont les *climats insulaires*, offerts par les îles qui sont placées au milieu de mers très-étendues. — Ces différences sont rendues frappantes par les caractères spéciaux de la végétation particulière à chacun de ces climats.

160. **Influence de l'altitude.** — L'observation montre encore que, en chaque point du globe, la température diminue à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère : cet abaissement de température est d'environ 1 degré pour un accroissement de hauteur ou d'*altitude* de 180 mètres. — Cette simple remarque montre que, si l'on veut se rendre compte des valeurs des températures observées en tel ou tel lieu, on devra avoir égard, non-seulement à sa latitude et à sa situation près des côtes ou dans l'intérieur des continents, mais aussi à sa hauteur au-dessus du niveau de la mer.

On s'explique également ainsi comment la limite des *neiges perpétuelles* se trouve, sur les diverses montagnes, à des latitudes variables selon la position géographique de ces montagnes elles-mêmes. A Quito, dans le voisinage de l'équateur, elle est à 4,800 mètres au-dessus du niveau de la mer ; dans les montagnes de l'Islande, au voisinage du cercle polaire boréal, elle n'est qu'à 936 au-dessus de ce même niveau.

DES VENTS.

161. **Des vents en général.** — Les *vents* sont dus aux courants qui se produisent lorsque, pour une cause quelconque, l'équilibre est rompu entre les différentes couches de l'atmosphère. — Ainsi, quand une région a été fortement échauffée par les rayons du soleil, les couches d'air voisines du sol, qui ont participé à cet échauffement, s'élèvent et sont remplacées par de l'air plus froid, qui afflue des régions voisines. De même encore, si une grande quantité de vapeur, se résolvant en pluie, produit un vide, il se produit un vent, soufflant des régions voisines vers celle où la condensation a eu lieu.

162. **Vents réguliers.** — On nomme *vents réguliers* ceux qui soufflent à des époques fixes en des points déterminés, de façon qu'on en puisse prévoir la durée ou le retour, et les différents caractères. — Les uns sont des vents *constants*, c'est-à-dire soufflant d'une manière continue, les autres sont des vents *périodiques*, c'est-à-dire revenant à des intervalles de temps réguliers.

Les seuls vents absolument constants sont les *vents alizés*, qui soufflent toute l'année dans le voisinage de l'équateur, et dont l'influence se fait sentir à une grande distance. Pour nous rendre compte de la production de ces vents, nous remarquerons que, dans les régions voisines de l'équateur, la température moyenne est plus élevée que sous les autres latitudes (158), de sorte que l'air qui est en contact avec le sol tend à s'élever : de plus, les eaux occupant une étendue beaucoup plus grande que les continents, il se fait dans ses régions une évaporation très-active : pour ces deux raisons, il se produirait, si la terre était immobile, une ascension des couches inférieures de l'atmosphère, qui seraient remplacées par de l'air affluant des zones tempérées, et, par suite, des courants dirigés, à la surface du sol, des pôles vers l'équateur. Mais la terre tourne autour de la ligne des pôles, et entraîne avec elle l'atmosphère qui l'environne. Ce sont ces deux vitesses qui produisent, comme l'a remarqué Halley, les vents alizés, soufflant, pour l'hémisphère boréal, dans la direction *nord-est*, et, pour l'hémisphère austral, dans la direction *sud-est*. Ces deux vents se rencontrent en arrivant sur l'équateur lui-même, et produisent un vent d'*est*. — Il règne en même temps dans les régions élevées de l'atmosphère un vent de sud-ouest pour l'hémisphère boréal, et un vent de nord-ouest pour l'hémisphère austral, dont l'existence est également d'accord avec la théorie.

Parmi les vents périodiques on peut citer les *brises* qui se produisent, presque chaque jour, sur les côtes. La *brise de mer* souffle le matin : au lever du soleil, la terre s'échauffant plus vite que la mer, il s'établit une ascension de l'air en contact avec le sol, et par suite un appel de l'air

de la mer. La *brise de terre* s'élève, au contraire, au coucher du soleil, à cause du refroidissement plus rapide de la terre ferme. — Les *moussons* sont des vents périodiques qui règnent pendant six mois de l'année dans un sens, et pendant les six autres mois en sens contraire. On distingue, dans notre hémisphère, la *mousson de printemps*, qui souffle de la mer vers la terre quand la terre commence à s'échauffer sous l'influence des rayons solaires, et la *mousson d'automne*, qui souffle de la terre vers la mer quand la température de la terre commence à s'abaisser au-dessous de celle de la mer. Les moussons sont très-sensibles dans la mer des Indes. — Le *mistral*, qui souffle dans le midi de la France et qui est un vent du nord-ouest, est produit par l'échauffement des plaines de la Camargue et de la Crau. C'est un vent très-sec, parce qu'il amène, dans ces plaines, de l'air qui n'a passé que sur des continents, et qui, s'échauffant encore, s'éloigne de plus en plus de son point de saturation.

163. **Vitesse des vents.** — La vitesse du vent varie entre 1 mètre par seconde, qui est la vitesse d'un vent à peine sensible, et 40 mètres par seconde, qui est celle des ouragans. Le vent qui convient le mieux à la marche des navires a une vitesse d'environ 9 mètres par seconde.

CHAPITRE VI.

Chaleur rayonnante. — Rosée.

CHALEUR RAYONNANTE.

164. **Rayonnement de la chaleur**. — On dit que la chaleur se transmet *par rayonnement* lorsqu'elle franchit directement des intervalles plus ou moins considérables, sans échauffer les corps qui peuvent se trouver sur son passage.

165. **La chaleur traverse le vide**. — La chaleur qui nous arrive du soleil avec sa lumière, ne nous parvient qu'après avoir franchi les espaces célestes, où n'existe aucune matière pondérable : elle a donc traversé le vide. — La chaleur émise par des corps qui ne sont pas lumineux traverse également le vide. Pour le démontrer, il suffit de placer un petit thermomètre au centre d'un ballon de verre A (*fig.* 101), dans lequel on fait le vide en le soudant d'abord à l'extrémité d'un tube barométrique, remplissant le tout de mercure et l'installant sur une cuvette de manière à faire du ballon la chambre barométrique, puis fermant ensuite le col

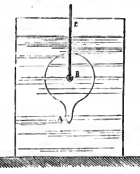


Fig. 101.

à la lampe. Quand on plonge ce ballon dans une cuve contenant de l'eau chaude, on voit le thermomètre accuser immédiatement une élévation de température.

166. **La chaleur traverse certains corps sans les échauffer.** — Un boulet rouge et un thermomètre étant placés de part et d'autre d'une nappe d'eau, qui s'écoule par une fente pratiquée à la partie inférieure d'un réservoir, la température du thermomètre s'élève. — Avec une lentille taillée dans un bloc de glace on a pu enflammer des substances combustibles. — Dans ces expériences, il est impossible d'admettre que la chaleur ne s'est transmise qu'en échauffant d'abord la nappe d'eau ou la glace qu'on place sur son trajet.

167. **Propagation rectiligne de la chaleur.** — Le réservoir d'un thermomètre étant placé en présence d'une source calorifique de petite dimension, si l'on interpose un petit écran de bois ou de carton sur un point de la droite qui les joint, on n'observe plus aucune élévation de température; si l'écran est placé dans toute autre région de l'espace, il y a transmission de chaleur. Donc la chaleur se propage en ligne droite, de la source au réservoir du thermomètre. — On nomme *rayon calorifique* toute direction rectiligne suivant laquelle se propage la chaleur rayonnante. Si l'on remarque d'ailleurs qu'un corps chaud émet de la chaleur dans tous les sens, on voit que toute droite partant d'un point quelconque de la surface de ce corps représente un rayon calorifique.

168. **Quantités de chaleur reçues normalement par une même surface, à différentes distances de la source.** — Soit S (*fig.* 102) un point émettant des rayons calorifiques dans tous les sens. Si l'on décrit une sphère autour de ce point comme centre et avec un rayon quelconque S B, elle reçoit, dans un temps déterminé, toute la chaleur émise par S. Si maintenant, supprimant cette sphère, on en décrit une autre avec un rayon S B′ double du premier, elle recevra, comme la première, toute la chaleur émise par S; or elle a une surface quatre fois égale à celle de la première, donc chaque centimètre carré pris sur la sphère S B′ recevra, dans le même temps, une quantité de chaleur égale au quart de celle que reçoit un centimètre carré pris sur la sphère S B. — Ce raisonnement est général; donc :

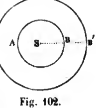


Fig. 102.

Les quantités de chaleur reçues normalement par une même surface située à différentes distances d'un point calorifique, sont inversement proportionnelles aux carrés de ces distances.

169. **Appareil de Melloni.** — Nous emploierons, pour les expériences qu'il nous reste à indiquer concernant les autres lois de la chaleur rayonnante, l'appareil qui est dû à Melloni. Il a l'avantage de se

prêter également à toutes ces expériences, et de fournir les résultats avec une grande simplicité.

Dans cet appareil, les quantités de chaleur sont mesurées par un instrument très-sensible, le *thermo-multiplicateur*. Il comprend :

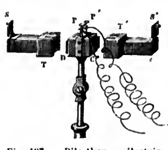


Fig. 103. — Pile thermo-électrique.

1° Une *pile thermo-électrique* C D (*fig.* 103), c'est-à-dire une chaîne formée alternativement (*fig.* 104) de barreaux de bismuth *a*, *a*..., et de barreaux d'antimoine *b*, *b*.... La figure 104 représente cette chaîne développée; la figure 103 la montre en CD, repliée et assujettie dans un étui de laiton.

2° Un *galvanomètre* G (*fig.* 104), réuni aux deux extrémités de la chaîne précédente par des fils métalliques, et dans lequel une aiguille aimantée, mobile au-dessus d'un cercle horizontal, accuse l'existence des courants électriques qui se propagent dans l'appareil.

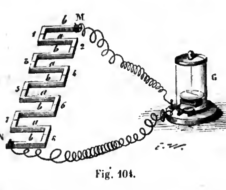


Fig. 104.

Le galvanomètre sera décrit plus loin avec détail : il nous suffira de savoir maintenant que la plus petite différence de température entre les soudures d'ordre impair 1, 3, 5... (*fig.* 104), et les soudures d'ordre pair 2, 4, 6.. , détermine la production d'un courant électrique qui dévie l'aiguille aimantée de la position dans laquelle elle s'était placée d'elle-même. De plus, ces écarts de l'aiguille sont d'autant plus grands que la différence de température est plus considérable. — Or, les soudures impaires forment l'une des faces D de la pile lorsqu'elle est repliée (*fig.* 103), les soudures paires forment l'autre face C : sur ces deux faces s'adaptent des tubes de cuivre T, T', munis d'opercules mobiles S, S'. Si donc on soulève un de ces opercules, S par exemple, l'autre opercule S' restant abaissé, le moindre rayonnement calorifique, arrivant du côté S, produira une déviation de l'aiguille : on conçoit même que la grandeur de la déviation peut servir de mesure à l'intensité de la chaleur incidente.

Dans l'appareil de Melloni, la pile est montée sur un support qui glisse

le long d'une règle métallique A B (*fig.* 105). D'autres supports analogues servent à placer, sur la même règle, soit les sources de chaleur nécessaires aux expériences, soit les écrans destinés à intercepter les rayons

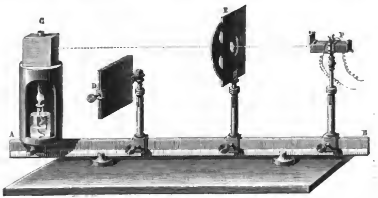


Fig. 105. — Appareil de Melloni.

qui devront être arrêtés. — Le galvanomètre, qui n'est pas visible sur la figure 105, est réuni à la pile au moyen de fils métalliques assujettis en P.

170. **Émission de la chaleur rayonnante. — Pouvoirs émissifs.** — Plaçons sur la règle A B de l'appareil de Melloni (*fig.* 105). en présence de la pile thermo-électrique P, un cube métallique C rempli d'eau bouillante, et dont les faces sont recouvertes de diverses substances : l'une d'elles est enduite, par exemple, de noir de fumée, une autre de blanc de céruse, une troisième est métallique et brillante, etc. Un écran E, percé d'une ouverture, limite le faisceau de rayons qui arrivera du cube à la pile. — Supposons qu'on tourne d'abord vers la pile la face qui est enduite de noir de fumée. Dès que l'écran D est abaissé, comme l'indique la figure, on voit l'aiguille s'écarter de sa position primitive et s'arrêter, après quelques oscillations, dans une position qui fait avec la première un angle mesuré par le cercle gradué. On relève l'écran D, et on laisse l'aiguille revenir à sa position primitive. — On tourne alors vers la pile une autre face du cube, une face métallique, par exemple, et on recommence l'expérience : on observe une nouvelle déviation, beaucoup moindre que la première. — Avec une troisième face, on trouve encore une déviation différente, et ainsi de suite.

Or, dans ces expériences successives, les faces rayonnantes sont toutes à une même température, qui est celle de l'eau bouillante : de plus, ce sont toujours des surfaces d'égale étendue qui envoient leurs rayons à la pile. — Donc *les quantités de chaleur émises par des surfaces de diverses na-*

tures, à des températures égales, dépendent de la nature même de ces surfaces.

Parmi tous les corps, le noir de fumée émet à une température déterminée le maximum de chaleur. On est convenu de nommer ***pouvoir émissif*** d'un corps quelconque ***le rapport de la quantité de chaleur qu'il émet, à celle qu'émet le noir de fumée à la même température.*** Les pouvoirs émissifs sont donc en général des nombres moindres que l'unité. Cependant le pouvoir émissif du blanc de céruse est égal à 1, c'est-à-dire que le blanc de céruse émet la même quantité de chaleur que le noir de fumée, à la même température. — Les métaux ont en général un pouvoir émissif très-faible : le pouvoir émissif de l'argent poli est seulement égal à 0,025. On s'explique ainsi, par exemple, comment le thé se conserve longtemps chaud dans les théières métalliques.

171. **Réflexion de la chaleur rayonnante. — Pouvoirs réflecteurs**. — Lorsqu'un rayon de chaleur tombe sur une surface bien polie, il est ***réfléchi***, c'est-à-dire renvoyé en avant de la surface, comme sont réfléchis les rayons du soleil quand on les reçoit sur un miroir. — Les lois de la réflexion de la chaleur sont exactement les mêmes que les lois de la réflexion de la lumière. Ces lois seront, pour la lumière, l'objet de vérifications précises : nous nous contenterons donc de démontrer ici que, si des rayons calorifiques tombant sur une surface polie ont la même direction que des rayons lumineux tombant sur la même surface, ces rayons calorifiques auront encore, après réflexion, la même direction que les rayons lumineux réfléchis.

Lorsqu'on reçoit sur un miroir sphérique concave, dans la direction de son axe, des rayons lumineux parallèles, ils viennent tous passer, après réflexion, en un même point qu'on appelle le ***foyer principal*** du miroir : il y a, en ce point, concentration de lumière. Réciproquement, si au foyer principal d'un pareil miroir on place une source de lumière,

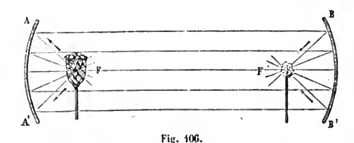


Fig. 106.

les rayons émis par la source sur le miroir sont renvoyés parallèlement à l'axe principal. — Cela posé, installons deux miroirs sphériques concaves A A', B B' (*fig.* 106) en regard l'un de l'autre, et de manière

que leurs axes coïncident. On dit alors que les deux miroirs sont *conjugués*. Plaçons d'abord au foyer F la flamme d'une bougie : les rayons lumineux qu'elle envoie au miroir A A' sont réfléchis parallèlement à l'axe; ils tombent sur le miroir B B' et sont réfléchis au foyer F', de sorte qu'on peut voir en ce point, sur un petit écran de papier, une image très-brillante de la flamme. Substituons maintenant, à la flamme de la bougie, une petite grille pleine de charbons ardents, comme celle que représente la figure, et plaçons en F' de l'amadou ou du coton-poudre : la concentration des rayons calorifiques au point F' déterminera l'inflammation de la matière combustible.

La chaleur qui tombe sur une surface, quelque polie qu'elle soit, n'est jamais réfléchie d'une manière absolument complète. On nomme *pouvoir réflecteur* d'une surface *le rapport de la quantité de chaleur réfléchie à la quantité de chaleur incidente*. L'appareil de Melloni permet de déterminer les pouvoirs réflecteurs de plaques polies de diverses natures, en mesurant d'abord avec la pile la quantité de chaleur incidente, puis la quantité de chaleur qui est réfléchie par chacune de ces plaques. — De toutes les substances connues, ce sont les métaux qui ont le pouvoir réflecteur le plus grand.

172. **Diffusion ou réflexion irrégulière.** — Les substances mates, telles que le papier, le blanc de céruse, n'ont pas de pouvoir réflecteur proprement dit, c'est-à-dire que ces corps ne renvoient pas la chaleur dans une direction déterminée; ils en rejettent une partie dans toutes les directions. Ils agissent sur les rayons calorifiques comme sur les rayons lumineux; car, lorsqu'on les expose aux rayons solaires, par exemple, ils renvoient une partie de la lumière dans toutes les directions, ce qui les rend visibles de tous les points de l'espace. — C'est ce phénomène qu'on désigne, dans l'étude de la chaleur rayonnante comme en optique, sous le nom de *diffusion* ou de *réflexion irrégulière*.

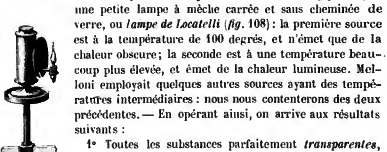
173. **Transmission de la chaleur rayonnante. — Pouvoirs diathermanes.** — L'expérience nous a déjà montré que certains corps laissent passer la chaleur rayonnante (166), comme les corps transparents laissent passer la lumière. — On nomme *substances diathermanes* celles qui sont douées de cette propriété; *substances athermanes* celles qui arrêtent complétement la chaleur incidente.


Fig. 107.

Le *pouvoir diathermane* d'un corps est *le rapport de la quantité de chaleur transmise à la quantité de chaleur incidente*. — Pour mesurer le pouvoir diathermane d'une plaque de verre, de sel gemme, d'alun, au moyen de l'appareil de Melloni, on la placera sur une petite tablette (*fig.* 107), entre la source de chaleur et la pile : on mesurera la quantité de chaleur transmise, au moyen de la déviation

du galvanomètre; puis, supprimant la plaque, on mesurera de même la quantité de chaleur incidente. Enfin on prendra le rapport de ces deux quantités.

Ces expériences ont été faites en employant successivement, avec une même plaque, diverses sources de chaleur à des températures plus ou moins élevées. Par exemple, le cube plein d'eau bouillante (*fig.* 105) et une petite lampe à mèche carrée et sans cheminée de verre, ou *lampe de Locatelli* (*fig.* 108) : la première source est à la température de 100 degrés, et n'émet que de la chaleur obscure; la seconde est à une température beaucoup plus élevée, et émet de la chaleur lumineuse. Melloni employait quelques autres sources ayant des températures intermédiaires : nous nous contenterons des deux précédentes. — En opérant ainsi, on arrive aux résultats suivants :


Fig. 108.

1° Toutes les substances parfaitement *transparentes*, c'est-à-dire laissant passer les rayons lumineux, laissent passer aussi, en proportion considérable, les rayons de *chaleur lumineuse* : ainsi le verre, le cristal de roche ont un pouvoir diathermane assez grand pour la chaleur de la lampe de Locatelli.

2° Certaines substances, bien que tout à fait transparentes pour la lumière, arrêtent la plus grande partie de la *chaleur obscure :* ainsi les substances précédentes, verre, cristal de roche, ne laissent pas passer, en quantité appréciable, la chaleur du cube à eau bouillante.

3° D'autres substances, au contraire, sont également diathermanes pour *toute espèce de chaleur :* ainsi le sel gemme laisse toujours passer les 0,92 de la chaleur incidente; son pouvoir diathermane est 0,92, quelle que soit la source calorifique employée.

Ces principes offrent de nombreuses applications.

174. Absorption de la chaleur rayonnante. — Pouvoirs absorbants. — La chaleur *absorbée* par un corps est la portion de chaleur incidente qui n'est ni renvoyée par réflexion ou diffusion, ni transmise au travers du corps : elle est retenue par lui, et produit une élévation de température ou un changement d'état.

On nomme *pouvoir absorbant* d'un corps *le rapport de la quantité de chaleur absorbée à la quantité de chaleur incidente.*

Le pouvoir absorbant des substances diathermanes dépend de la nature de la substance et aussi de la nature de la source : avec une même source, le pouvoir absorbant d'une même substance augmente avec l'épaisseur de cette substance elle-même, mais seulement jusqu'à une certaine limite.

Quant à la chaleur absorbée par les corps athermanes, elle est évi-

demment égale à l'excès de la chaleur incidente sur la chaleur renvoyée par réflexion ou diffusion. — De là résulte que, si l'on considère en particulier des corps athermanes et absolument dépourvus de pouvoir diffusif, tels que des métaux parfaitement polis, la chaleur absorbée est l'excès de la chaleur incidente sur la chaleur réfléchie : en d'autres termes, pour ces corps, *le pouvoir absorbant est complémentaire du pouvoir réflecteur*. — Il suffit donc de mesurer le pouvoir réflecteur (171) pour en déduire le pouvoir absorbant.

Enfin, parmi les substances athermanes, le noir de fumée est dénué de tout pouvoir réflecteur et de tout pouvoir diffusif. De là résulte que le noir de fumée *absorbe intégralement* toute espèce de chaleur incidente; le *pouvoir absorbant* d'un corps quelconque, défini comme nous l'avons fait, est donc aussi le *rapport de la quantité de chaleur qu'il absorbe, à celle qu'absorbe le noir de fumée dans les mêmes conditions.*

175. **Égalité des pouvoirs émissifs et absorbants.** — On a déterminé par l'expérience la valeur des pouvoirs absorbants d'un certain nombre de substances; nous venons de montrer que, pour les métaux polis, par exemple, il suffit de connaître leur pouvoir réflecteur. On a déterminé également les pouvoirs émissifs de ces mêmes substances par rapport au noir de fumée (170). Ces deux séries d'expériences ont toujours donné, pour un même corps et pour une même espèce de chaleur, des nombres identiques. — C'est ce résultat de l'expérience qu'on exprime en disant que *le pouvoir émissif d'un corps est égal à son pouvoir absorbant*, pour la même espèce de chaleur.

176. **Équilibre mobile de température.** — Quand plusieurs corps à des températures inégales sont mis en présence, les plus froids s'échauffent, les plus chauds se refroidissent, et ces phénomènes se continuent jusqu'au moment où tous les corps parviennent à une même température, intermédiaire entre la plus haute et la plus basse : ils la conservent indéfiniment, s'il n'intervient aucune nouvelle cause de dégagement ou d'absorption de chaleur.

Ces résultats pourraient être interprétés en admettant que les corps les plus chauds envoient de la chaleur aux plus froids, et que ce rayonnement cesse quand la température est devenue uniforme. Mais il paraît singulier de supposer que, pour chaque corps, la faculté d'émettre de la chaleur soit subordonnée à la température des corps environnants, et qu'il perde cette faculté quand il est à une température égale ou inférieure à la leur. — Prevost, de Genève, a proposé d'expliquer les résultats précédents en admettant que les corps rayonnent toujours de la chaleur, mais en quantité d'autant plus grande que leur température est plus élevée. Dès lors, un corps chaud mis en présence d'un corps froid émet plus de chaleur qu'il n'en reçoit, et il se refroidit; le corps froid absorbe plus de chaleur qu'il n'en émet, et il s'échauffe; quand ils

sont parvenus à la même température, le rayonnement ne cesse pas pour cela, mais l'échange de chaleur qui s'opère incessamment entre les corps, donnant toujours pour chacun d'eux une perte égale au gain, les maintient dans un état stationnaire. Cette théorie a été introduite dans la science sous le nom d'***hypothèse de l'équilibre mobile de température***.

177. **Réflexion apparente du froid**. — Lorsque, dans l'expérience des ***miroirs conjugués***, on place au foyer F (*fig.* 106) un ballon de verre contenant un mélange réfrigérant, et au foyer F' un thermomètre, on voit le thermomètre s'abaisser de plusieurs degrés. Cette expérience, célèbre dans la science, semblait conduire à admettre l'existence de rayons frigorifiques. — L'hypothèse de l'équilibre mobile de température permet de rendre compte du résultat, sans la nouvelle hypothèse des rayons frigorifiques. Nous supposerons, pour plus de simplicité, que les parois de l'enceinte, la surface du thermomètre et celle du ballon soient dépourvus de pouvoir réflecteur et aient des pouvoirs émissifs égaux. Avant que le mélange réfrigérant soit placé en F, le thermomètre F' est à la même température que l'enceinte : or, il envoie sur B B' un faisceau de rayons divergents qui sont réfléchis sur A A', et de là vers l'enceinte, en passant par F ; dans les mêmes directions, et en sens inverse, se propagent des rayons venant de l'enceinte, passant par F, et rendus convergents vers F' ; puisque l'enceinte et le thermomètre ont même pouvoir émissif, par suite même pouvoir absorbant et pas de pouvoir réflecteur, la perte de chaleur reste, pour le thermomètre, toujours égale au gain, et l'équilibre de température persiste. Au contraire, lorsqu'on vient à placer en F le mélange réfrigérant, les rayons qui venaient de l'enceinte en passant par F, sont remplacés par ceux qu'envoie le corps froid ; le thermomètre reçoit donc moins de chaleur que précédemment : il perd plus de chaleur qu'il n'en reçoit, et sa température s'abaisse.

ROSÉE.

178. **Formation de la rosée.** — On donne le nom de *rosée* à ces gouttelettes d'eau qui apparaissent, pendant les nuits sereines, sur les corps placés en plein air.

Après une journée chaude, quand le soleil a disparu, la surface du sol échauffé continue à rayonner vers les espaces célestes, et sa température s'abaisse : l'air qui constitue l'atmosphère rayonne aussi de la chaleur, mais, comme il a un pouvoir émissif moindre, son abaissement de température est moins considérable. Donc, si la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère n'est pas très-éloignée de son point de saturation, elle se refroidit surtout dans les points qui sont en contact avec le sol, et elle se condense en gouttelettes.

Il est facile dès lors de s'expliquer l'influence des principales circonstances qui favorisent ou empêchent le dépôt de rosée :

1° La présence de nuages, le voisinage d'arbres ou d'édifices élevés qui masquent une partie du ciel, diminuent la quantité de rosée, ou même l'empêchent de se former. — Dans ce cas, en effet, l'échange de chaleur qui s'effectue, entre le sol et les corps qui sont à une température voisine, ne produit plus qu'un refroidissement peu intense.

2° Un vent léger favorise la formation de la rosée; un vent fort rend le dépôt impossible. — On conçoit, en effet, qu'un vent léger renouvelle lentement les couches d'air qui apportent leur vapeur d'eau; si en même temps ce vent est humide, comme l'est en France le vent qui vient du sud-ouest, la rosée sera abondante. Au contraire, un vent fort entraîne sans cesse l'air, avant qu'il se soit refroidi.

3° Les corps de diverses natures se couvrent de quantités de rosée très-inégales. — Les feuilles, le bois, la terre, qui ont un grand pouvoir émissif, et qui sont des corps très-peu conducteurs, sont ceux où la rosée se forme le plus abondamment. Sur les pierres, les métaux polis, qui ont un pouvoir émissif faible et qui sont des corps conducteurs, il ne s'en forme que des quantités insensibles.

179. **Givre.** — Le *givre*, ou gelée blanche, est une petite couche de glace spongieuse, qui se forme dans les mêmes circonstances que la rosée, par un abaissement de température encore plus considérable. La vapeur d'eau se congèle alors, dans l'air lui-même, au voisinage des corps refroidis, et elle vient se déposer sur eux en formant une sorte de neige.

LIVRE III. — ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.

Électricité. — Développement de l'électricité par le frottement. — Corps conducteurs; corps non conducteurs.
L'électricité se porte à la surface des corps, et s'accumule vers les pointes.
Électricité par influence. — Électroscope. — Machine électrique. — Électrophore.
Électricité dissimulée. — Condensateurs. — Bouteille de Leyde. Batteries électriques. — Électromètre condensateur.
Électricité atmosphérique. — Tonnerre. — Paratonnerre.

DÉVELOPPEMENT ET DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ.

180. **Développement de l'électricité par le frottement. — Corps conducteurs, et non conducteurs.** — Le frottement développe dans l'ambre jaune au succin (ἤλεκτρον) la propriété d'attirer les

corps légers, tels que des barbes de plume, des petits morceaux de papier, de la sciure de bois : on a donné le nom d'*électricité* à la cause de ce phénomène et d'un certain nombre d'autres qui vont être étudiés. — Il est commode, pour se rendre compte des propriétés des corps électrisés, de les attribuer à un *fluide* impondérable que le frottement développerait dans ces corps : ce n'est là qu'une pure hypothèse, mais elle permet de relier assez simplement entre eux les phénomènes connus, et nous l'adopterons dans ce qui va suivre.

Tous les corps de la nature peuvent être électrisés par le frottement : mais les uns sont *conducteurs* de l'électricité, et le fluide se répand presque instantanément sur tous leurs points ; les autres sont des corps *non conducteurs*, et le fluide, développé en quelques-uns de leurs points, y reste adhérent. — Le verre, la résine, le soufre sont des corps non conducteurs : il suffit de frotter pendant quelques instants l'une des extrémités d'un bâton de verre ou d'un bâton de résine, pour constater que les points frottés acquièrent et conservent la propriété d'attirer les corps légers. — Les métaux sont des corps conducteurs.

L'eau et les corps imprégnés de liquides aqueux, le corps humain, le sol conduisent aussi l'électricité, et c'est là ce qui a fait longtemps méconnaître, dans les métaux, la propriété de s'électriser par le frottement. Lorsqu'on frotte une tige de métal en la tenant à la main, le fluide développé dans les points frottés se répand sur les points voisins, dans le corps de l'expérimentateur et dans le sol : sa présence devient donc insensible, à cause de la grande étendue des corps sur lesquels il s'est distribué : de là le nom de *réservoir commun*, employé par les physiciens pour désigner le globe terrestre. Mais si l'on vient à frotter un cylindre métallique A, en le tenant par un manche de verre M (*fig.* 109), on constate que le métal attire les corps légers : le verre, corps non conducteur, agit dans ce cas comme une sorte de barrière, empêchant le fluide de s'écouler dans le sol : c'est ce qu'on exprime en disant qu'il joue, par rapport au métal, le rôle d'un corps *isolant*.

Fig. 109.

L'air est un corps mauvais conducteur : il est clair en effet que, si l'air n'était pas isolant, l'électricité ne pourrait être maintenue à la surface des corps, et les phénomènes électriques nous seraient inconnus. Mais il devient conducteur dès qu'il est humide ce qui rend toujours les expériences d'électricité difficiles quand la vapeur d'eau de l'atmosphère n'est pas éloignée du point de saturation.

181. **Distinction des deux électricités.** — Un des corps légers qu'il est le plus commode d'employer, pour l'étude des propriétés des corps électrisés, est le *pendule électrique* : c'est une petite balle de su-

reau A (*fig.* 110), isolée par un fil de soie E fixé lui-même à un support de verre C.

Si, après avoir frotté un bâton de résine, on l'approche de la balle de sureau, on constate qu'elle est attirée, vient toucher la résine, et est ensuite repoussée : or le sureau, corps conducteur, a pris une partie de l'électricité de la résine ; on en peut donc conclure que deux corps chargés de l'électricité de la résine se repoussent. — Frottons alors un bâton de verre, et approchons-le de la balle de sureau, pendant qu'elle est chargée comme nous venons de le dire : elle sera vivement attirée. Il est donc évident que l'électricité du verre n'est pas identique à celle de la résine : ces deux électricités différentes sont désignées sous les noms d'électricité *vitrée* ou *positive*, et d'électricité *résineuse* ou *négative*.

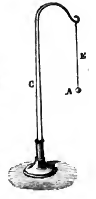


Fig. 110.

De même, si l'on touche la petite balle avec la main, pour conduire dans le sol le fluide qui s'y trouve, et qu'on en approche ensuite un bâton de verre électrisé, on verra qu'il y a attraction, contact, puis répulsion : à ce moment, la balle est au contraire attirée par la résine.

De l'ensemble de ces expériences on peut conclure :

1° Que *deux corps chargés de la même électricité se repoussent.*

2° Que *deux corps chargés, l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité négative, s'attirent.*

Il est clair d'ailleurs que des expériences de ce genre ne peuvent conduire à distinguer une troisième espèce d'électricité ; car si l'on prend un pendule chargé, par exemple, d'électricité négative, et qu'on en approche un corps quelconque électrisé, selon qu'on observera une attraction ou une répulsion, on en conclura que le corps est chargé d'électricité positive ou d'électricité négative.

182. **Deux corps frottés l'un contre l'autre acquièrent des électricités contraires.** — Lorsqu'on frotte l'un contre l'autre deux corps bien isolés, par exemple un plateau de verre C (*fig.* 111) et un plateau de bois B couvert d'une étoffe de laine, ces plateaux étant supportés tous deux par des manches de verre, on constate, en les approchant ensuite d'un pendule électrique, que le premier est chargé d'électricité positive, et le second d'électricité négative. — On obtient des résultats analogues quels que soient les corps qu'on frotte l'un contre l'autre.

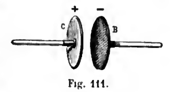


Fig. 111.

183. **Hypothèse des deux fluides. — État neutre.** — Les résultats précédents ont conduit à admettre qu'il existe dans tous les corps deux fluides différents, qu'on appelle *fluide positif* et *fluide négatif:* les molécules de chacun d'eux se repoussent entre elles, et attirent les molécules du fluide contraire. — Lorsqu'un corps n'est pas électrisé, on admet qu'il contient, dans tous ses points, les deux fluides en quantités égales, de sorte que leurs actions contraires ne peuvent se manifester; on dit que le corps est à l'*état neutre*.

D'après cette théorie, le frottement de deux corps l'un contre l'autre accumulerait le fluide positif dans l'un, le fluide négatif dans l'autre, en sorte que, au moment de la séparation, ils contiendraient chacun un des deux fluides en quantité prédominante. — Quant à l'action que le fluide prédominant exerce alors sur les corps extérieurs, elle sera expliquée plus loin.

184. **Lois des attractions et répulsions électriques.** — L'attraction ou la répulsion que deux corps électrisés exercent l'un sur l'autre dépend à la fois de la *distance* à laquelle ils sont placés, et des *quantités d'électricité* dont chacun d'eux est chargé.

L'expérience a établi les deux lois suivantes :

1° *Les forces attractives ou répulsives qui s'exercent entre deux corps électrisés sont en raison inverse des carrés de leurs distances.*

2° *A une distance constante, ces forces sont proportionnelles aux produits des deux quantités d'électricité.*

Ces lois peuvent être vérifiées à l'aide d'un appareil imaginé par Coulomb, et connu sous le nom de balance de torsion : nous ne décrirons ici ni l'appareil, ni la méthode de Coulomb, et nous admettrons les deux lois comme établies par l'expérience.

185. **L'électricité se porte à la surface des corps conducteurs.** — Prenons une sphère métallique A (*fig.* 112), isolée par un fil de soie ou par un pied de verre, et deux hémisphères métalliques creux B, C, qu'on maintiendra par des manches de verre et qui pourront s'appliquer exactement sur la sphère. — Les hémisphères étant en place, électrisons le

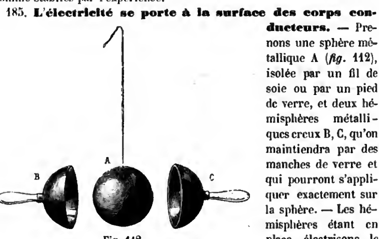


Fig. 112.

système, au moyen de la machine électrique qui sera décrite plus loin; puis enlevons rapidement les deux hémisphères. Nous constaterons, en les approchant d'un pendule électrique, qu'ils sont électrisés, tandis que la sphère ne présente aucune trace d'électricité : l'électricité s'était donc portée tout entière à la surface.

L'expérience conduit au même résultat quelle que soit la forme du corps conducteur.

186. **Influence de la forme des corps conducteurs sur la distribution de l'électricité à leur surface.** — Pour étudier la distribution de l'électricité à la surface des corps de diverses formes, on emploie un *plan d'épreuve*, c'est-à-dire un petit disque de clinquant, isolé au bout d'une longue tige de gomme laque P (*fig.* 113) : lorsqu'on touche avec ce disque un point quelconque M d'un corps électrisé et isolé, il se substitue en quelque sorte à l'élément de surface touché, et se charge de la même quantité d'électricité. On peut donc déterminer les quantités d'électricités qui se trouvent aux divers points, par les charges que ces points communiquent successivement au plan d'épreuve. — On peut avoir une idée approximative de la grandeur des charges, par leur action sur un pendule électrique : quant à la mesure exacte, elle ne peut être effectuée qu'avec la balance de Coulomb.

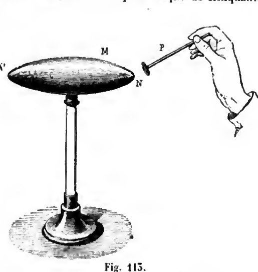


Fig. 113.

En opérant ainsi on trouve que, sur une sphère métallique, la quantité d'électricité est sensiblement la même en tous les points de la surface; c'est ce qu'il était facile de prévoir, puisque tous les points de la surface sont à la même distance du centre.

Sur un ellipsoïde tel que C (*fig.* 113), les quantités d'électricités accumulées aux extrémités des axes sont proportionnelles aux longueurs de ces axes : elle est beaucoup plus grande en N et N' qu'en tout autre point.

187. **L'électricité s'accumule vers les pointes.** — D'après le

résultat fourni par l'expérience, sur la distribution de l'électricité dans un ellipsoïde, on peut prévoir que, si le grand axe de l'ellipsoïde s'allonge indéfiniment par rapport aux autres, c'est-à-dire si le corps se termine par une pointe, l'électricité doit tendre à s'accumuler vers son extrémité. — Or, s'il en est ainsi, les molécules de fluide de même nom qui se portent vers la pointe doivent exercer les unes sur les autres une répulsion tendant à les chasser du corps, malgré la résistance de l'air. L'espèce de pression sur l'air environnant, qui se manifeste toujours à la surface des corps électrisés, et qu'on nomme la *tension*, acquiert en effet une valeur d'autant plus grande que la pointe est plus aiguë; elle triomphe de la résistance de l'air, et l'électricité s'échappe.

C'est ce que l'on peut constater en adaptant, sur une machine électrique qui fonctionne régulièrement, une pointe métallique : la machine perd immédiatement toute l'électricité dont elle était chargée, et il devient impossible de la charger de nouveau. — C'est pourquoi on a toujours soin de limiter par des surfaces arrondies les corps conducteurs qu'on veut charger d'électricité.

Le fluide qui s'échappe par une pointe se porte sur l'air environnant : de là une répulsion entre l'air et la pointe qu'on y adapte. — Si la pointe est fixe, l'air est vivement chassé, et, si le fluide se renouvelle d'une manière continue, il se produit un courant d'air très-vif, qui peut souffler la flamme d'une bougie. — Au contraire, dans le *tourniquet électrique* (*fig.* 114), on a un système de pointes qui sont mobiles, et qui reculent sous l'influence de la répulsion de l'air. L'appareil se compose d'un certain nombre de tiges métalliques horizontales, fixées dans une chape qui est mobile sur un pivot C, et terminées par des pointes courbées dans le même sens : le pivot étant placé sur la machine, l'appareil se met en mouvement en sens inverse de la direction des pointes.

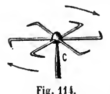


Fig. 114.

ÉLECTRICITÉ PAR INFLUENCE.

188. **Développement de l'électricité par influence.** — Soit un cylindre métallique isolé et à l'état neutre B C (*fig.* 302); en présence de ce cylindre plaçons un corps électrisé quelconque : par exemple, une sphère A chargée d'électricité positive. Si l'on a eu soin de suspendre, à chacune des extrémités B, C du cylindre, un couple de petits pendules formés de balles de sureau suspendues à des fils conducteurs de lin, on voit les pendules de chaque couple s'écarter l'un de l'autre. Il y a donc en B et C développement d'électricité : quant à la nature des fluides, on peut la déterminer, pour chacun de ces points, en en approchant un petit

pendule chargé, par exemple, d'électricité négative : il sera attiré par la portion du cylindre voisine de C, et repoussé par la portion voisine de B. Donc, des deux fluides dont la réunion constituait pour B C l'état neutre, le fluide négatif attiré par A s'est accumulé vers B, le fluide positif repoussé s'est réfugié vers C. — Si, à ce moment, on éloignait la sphère A, les fluides séparés dans le cylindre se réuniraient, et il retomberait à l'état neutre.

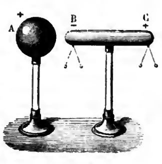


Fig. 115.

Au contraire, si on touche avec le doigt l'extrémité C, pendant que la sphère est en présence du cylindre, le fluide positif s'écoule dans le sol, et les pendules C retombent. Le fluide négatif reste maintenu en B par l'attraction de A : il s'en accumule même en ce point une quantité un peu plus grande, par la décomposition d'une nouvelle quantité de fluide neutre : les pendules B divergent donc un peu plus qu'auparavant. — Si maintenant on supprime la communication avec le sol, et qu'on éloigne A, le cylindre reste chargé d'électricité négative qui se répand sur toute sa surface : les deux couples de pendules divergent de nouveau, mais ils sont chargés tous deux d'électricité négative. En résumé, on a donc ainsi chargé le cylindre BC, sous l'influence de A, d'une électricité *contraire à celle de* A.

Remarque. — L'expérience donnerait encore le même résultat, si, au lieu de mettre le point C en communication avec le sol, on touchait un point quelconque du cylindre, même le point B. — C'est ce dont on peut se rendre compte, en remarquant que le cylindre, le corps humain et le sol forment toujours un système de corps conducteurs, et, dans ce système, la sphère attire le fluide négatif vers les points les plus voisins d'elle, et repousse le fluide positif dans le sol : quand on supprime la communication, le cylindre doit donc rester toujours chargé de fluide négatif.

189. **Attraction des corps légers par les corps électrisés. — Étincelle électrique.** — C'est par le développement de l'électricité par influence qu'on peut s'expliquer l'attraction qu'exercent les corps électrisés sur les corps légers. — Soit une balle de sureau, par exemple, à laquelle on présente un bâton de verre chargé d'électricité positive. Le sureau étant conducteur, son fluide neutre est décomposé : le fluide négatif s'accumule dans les points qui sont les plus voisins du bâton de verre, et le fluide positif dans les points les plus éloignés. D'autre part, il est indispensable d'admettre, pour expliquer la conservation des fluides dans les corps conducteurs en général, qu'il existe à leur surface une couche d'air adhérente, dans laquelle s'accumule l'électricité libre : dès

lors, l'attraction qui s'exerce ici, entre le fluide positif de la source et le fluide négatif accumulé sous la couche d'air adhérente à la balle, devenant bientôt supérieure à la répulsion exercée par la source sur le fluide positif de la balle, parce qu'elle s'exerce à une distance moindre, la balle se met en mouvement vers le bâton de verre.

L'étincelle électrique est due à la combinaison des deux fluides contraires, qui s'effectue entre un corps électrisé et un corps conducteur soumis à l'influence du premier, quand l'attraction exercée entre ces deux fluides est suffisante pour vaincre la résistance de l'air. L'étincelle peut d'ailleurs se produire encore quand le milieu interposé est un autre corps *mauvais conducteur* quelconque : au contraire, il n'y a jamais étincelle entre des corps séparés par un milieu conducteur, ni dans le vide. — Après l'étincelle, une partie du fluide du corps influent est neutralisée par le fluide contraire, et le fluide de même nom est en excès dans le corps influencé : le résultat est donc le même que si une partie de l'électricité du corps influent s'était simplement communiquée au corps influencé.

190. **Électroscope à feuilles d'or.** — L'électroscope à feuilles d'or sert à déterminer la nature du fluide développé dans un corps électrisé. Il se compose d'une tige métallique BB' (*fig.* 116), portant à sa partie inférieure deux petites feuilles d'or *a*, *b*, et fixée dans la tubulure d'une cloche de verre C : l'air intérieur est maintenu sec par des fragments de chlorure de calcium; la cloche est couverte d'un vernis isolant, et la tige est elle-même placée soit dans un bouchon garni de gomme laque, soit dans l'axe d'un tube de verre porté par une monture métallique. En face de l'extrémité inférieure des feuilles d'or sont deux petites colonnes métalliques *c*, *d*, fixées de part et d'autre au plateau métallique qui reçoit la cloche.

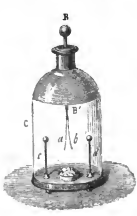


Fig. 116.
Électroscope à feuilles d'or.

Pour faire usage de l'instrument, on commence par le charger d'une électricité connue. On en approche, par exemple, un bâton de résine électrisé négativement, et on touche du doigt l'extrémité B de la tige : le fluide positif de la tige et des feuilles d'or est maintenu en B par la résine, tandis que le fluide négatif est repoussé dans le sol (188, *Remarque*) ; les feuilles d'or restent verticales. Si, maintenant, on enlève le doigt et qu'on éloigne ensuite le bâton de résine, le fluide positif qui avait été retenu en B se répand sur toute la tige et sur les feuilles d'or : les feuilles divergent. L'instrument reste donc chargé de fluide positif.

c'est-à-dire du fluide contraire à celui du corps qu'on a employé pour le charger. — Pour reconnaître maintenant de quelle électricité est chargé un corps électrisé, par exemple un bâton de soufre qu'on aura frotté, on l'approche lentement de l'extrémité B : s'il détermine un rapprochement des feuilles d'or, c'est qu'il attire une partie de leur électricité et qu'il est lui-même chargé du fluide négatif : en l'approchant davantage, on peut d'ailleurs souvent produire une divergence, par la décomposition du fluide qui est resté neutre dans la tige. Au contraire, si en approchant un corps électrisé, de l'électroscope chargé de fluide positif, on observe immédiatement une divergence plus grande des feuilles, c'est que le corps est chargé de fluide positif.

Les tiges *c*, *d* servent à augmenter la sensibilité de l'instrument : sous l'influence du fluide développé dans les feuilles d'or, leur extrémité supérieure se charge de fluide contraire, et attire les feuilles elles-mêmes. En outre, si la divergence des feuilles devient trop grande, elles se déchargent dans le sol, par les tiges et le plateau métallique, et ne peuvent venir toucher le verre : on n'a donc pas à craindre que l'électricité communiquée au verre, par le contact des feuilles, ne modifie les indications de l'instrument.

191. Machine électrique. — Dans la machine électrique ordinaire (*fig.* 117), l'électricité est produite par le frottement d'un plateau de verre contre deux paires de coussins. Le plateau PP′ est circulaire : une manivelle G permet de lui donner un mouvement de rotation autour d'un axe fixé perpendiculairement en son centre. Les coussins B B, B′ B′ sont assujettis entre des montants de bois verticaux : ils sont formés de plaques de bois, recouvertes de plusieurs doubles d'une épaisse étoffe de laine, avec des feuilles d'étain interposées; à leur surface est appliquée une étoffe de taffetas, et le tout est enduit d'un amalgame d'étain, de zinc et de bismuth. Deux cylindres métalliques isolés C, C′, qu'on nomme les *conducteurs* de la machine, portent chacun, à celle de leurs extrémités qui avoisine le plateau, un fer à cheval métallique F, F′, qui embrasse le plateau et qui est garni à l'intérieur, sur ses deux branches, de pointes métalliques aiguës.

Lorsqu'on fait tourner le plateau, chacun de ses points se charge de fluide positif au moment où il passe entre les coussins : les coussins eux-mêmes se chargent de fluide négatif, mais ce fluide est conduit dans le sol par la chaîne métallique M. Quand un point électrisé du plateau arrive entre les branches du fer à cheval suivant, il décompose par influence le fluide neutre des conducteurs, repousse le fluide positif vers les parties les plus éloignées, et attire le fluide négatif vers les pointes des fers à cheval par lesquelles ce fluide s'écoule. De là résulte : 1° que les conducteurs restent chargés de fluide positif; 2° que les points du plateau qui ont franchi les fers à cheval sont ramenés à l'état neutre. — Ces mêmes

points, en repassant entre les coussins, s'électrisent de nouveau, et ainsi de suite.

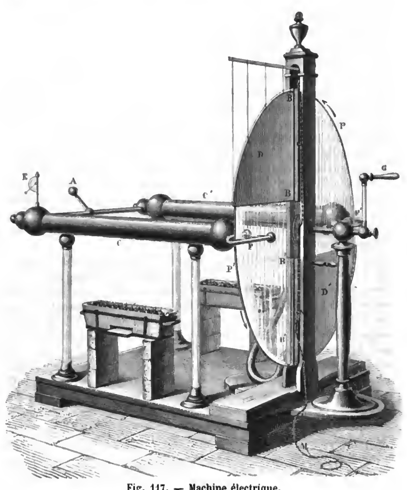


Fig. 117. — Machine électrique.

A mesure que l'on fait tourner le plateau de verre, la charge des conducteurs augmente. Elle ne peut cependant augmenter indéfiniment ; en effet, il arrive un moment où le fluide positif qui est déjà accumulé, repoussant le fluide positif que le plateau tendrait à mettre encore en liberté, l'empêche de venir s'ajouter à la charge des cylindres. — Il faut remarquer aussi qu'il s'effectue, par les supports de verre et par l'air lui-même, une déperdition continuelle, laquelle diminue beaucoup la

charge que les cylindres pourraient acquérir. On dessèche l'air et les supports en plaçant des fourneaux sur la machine; on environne le plateau de verre de quarts de cercle D, D', dans le trajet qu'ont à effectuer ses points, des coussins aux fers à cheval : mais toutes ces précautions n'ont jamais qu'une efficacité restreinte.

Un *électromètre de Henley* E, c'est-à-dire une petite balle de sureau supportée par une tige conductrice d'ivoire, est placé sur les conducteurs : l'angle de divergence de la tige permet d'apprécier, à chaque instant, la charge de la machine.

192. Électrophore. — On donne le nom d'*électrophore* à une sorte de machine électrique de petite dimension et peu coûteuse (*fig.* 118). C'est un disque ou *gâteau* de résine, coulé dans un moule de bois ou de métal, et sur lequel on pose un plateau de bois d'un plus petit diamètre, lequel est couvert d'une feuille d'étain : ce plateau est muni en son milieu d'un manche de verre isolant. — On électrise le gâteau de résine, en le frappant avec une peau de chat : il se charge d'électricité négative. On y dépose alors le plateau métallique, dont le fluide neutre est décomposé par influence : le fluide négatif est repoussé vers la face supérieure; le fluide positif est attiré vers la face inférieure, et n'est pas sensiblement neutralisé par le fluide négatif de la résine, parce que la résine n'est pas conductrice. En approchant le doigt de la face supérieure du plateau, on obtient une petite étincelle, due à la combinaison du fluide négatif de cette face avec le fluide positif de la main. Quand on soulève le plateau par le manche de verre, le fluide positif, primitivement maintenu sur sa face inférieure, se répand sur toute sa surface : il peut alors donner une étincelle quand on en approche le doigt, ou servir à charger d'électricité un corps conducteur quelconque. — Le gâteau de résine une fois électrisé, il peut continuer à développer du fluide positif dans le plateau métallique, un nombre de fois presque indéfini : on l'emploie, par exemple, dans les laboratoires de chimie, pour communiquer aux bouteilles de Leyde des charges assez fortes.

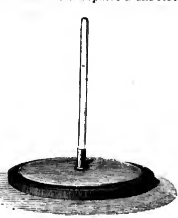


Fig. 118. — Electrophore.

193. Carillon électrique. — Grêle électrique. — Une tige métallique horizontale (*fig.* 119) communique avec les conducteurs de la machine électrique, et soutient, par des chaînes métalliques, deux tim-

bres T, T′ : entre ceux-ci est un autre timbre T″, suspendu par un fil de soie, et communiquant avec le sol par une chaîne de métal : dans les intervalles de ces timbres sont de petites balles métalliques *b*, *b′*, suspendues par des fils de soie. On fait marcher la machine : les timbres T, T′ se chargent de fluide positif : le timbre T″ se charge, par influence, de fluide négatif. Donc la balle *b*, par exemple, est d'abord attirée par T; en touchant ce timbre, elle se charge de fluide positif, et est alors attirée par T″; en touchant T″, elle lui cède son fluide positif, en sorte qu'elle est attirée de nouveau par T, et ainsi de suite. La balle *b′* oscille de même entre les timbres T′ et T″. Il se produit donc un *carillon* continu, tant que la machine fournit de l'électricité.

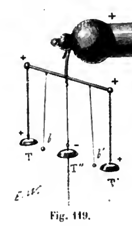


Fig. 119.

La *grêle électrique* s'explique d'une manière toute semblable. Une tige métallique fixée dans une cloche de verre (*fig.* 120) communique avec la machine électrique et se charge de fluide positif; le plateau métallique qui supporte la cloche, et qui communique avec le sol, se charge par influence de fluide négatif. De petites balles de sureau, placées dans l'appareil sont agitées d'un mouvement continuel, du plateau vers la tige, et de la tige vers le plateau. C'est par des mouvements semblables que Volta avait cru pouvoir expliquer la forme arrondie des grêlons, et le bruit particulier qui se fait entendre dans les nuages orageux avant la chute de la grêle.

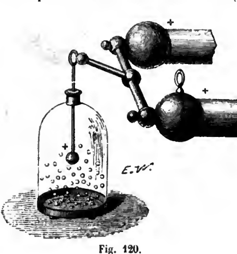


Fig. 120.

L'expérience connue sous le nom de *danse des pantins* n'est qu'une modification de la précédente, dans laquelle on remplace les balles de sureau par de petits pantins, assez légers pour obéir rapidement aux attractions successives auxquelles ils sont soumis.

ÉLECTRICITÉ DISSIMULÉE OU CONDENSÉE. CONDENSATEURS.

194. **Principe de la condensation. — Condensateur à plateaux.** — Lorsqu'un plateau métallique isolé A (*fig.* 121) est mis en communication avec une machine électrique fonctionnant d'une manière continue, et fournissant, par exemple, de l'électricité positive, il ne peut jamais acquérir qu'une charge limitée : cette limite est atteinte lorsqu'une molécule de fluide *m*, située dans le conducteur intermédiaire, éprouve la même répulsion de la part du fluide de A et de la part du fluide de la machine. — Si maintenant on place en présence de A un autre plateau B, mis en communication avec le sol, il y aura répulsion dans le sol du fluide positif de ce plateau, et attraction du fluide négatif sur la face qui regarde A. En même temps, ce fluide négatif, agissant à son tour sur le fluide positif de A, l'accumulera sur la face intérieure : de là une diminution de la force répulsive exercée par A sur la molécule *m* et sur les molécules voisines, de sorte qu'une nouvelle quantité de fluide positif pourra passer sur A ; donc, par le fait seul de la présence du plateau B communiquant avec le sol, il y aura *condensation* d'électricité positive sur le plateau A. — L'appareil prend le nom de *condensateur :* le plateau qui communique avec la source d'électricité est le *plateau collecteur*, celui qui communique avec le sol est le *plateau condensateur*.

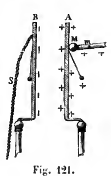


Fig. 121.

Il y aurait évidemment avantage, au point de vue de la condensation, à rapprocher le plus possible les deux plateaux; mais, les quantités de fluide qui sont accumulées allant toujours en croissant, il arriverait un moment où il jaillirait une étin-

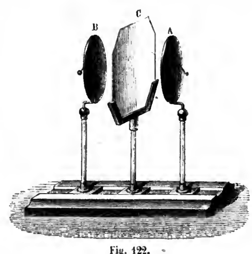


Fig. 122.

celle, et il y aurait combinaison des deux électricités. Aussi, pour pouvoir rapprocher davantage les plateaux, place-t-on entre eux une lame de verre C (*fig.* 122), vernie à la gomme laque. Pour charger l'appareil, on peut mettre les deux plateaux A et B au contact de C; cependant la lame ne présente encore qu'une résistance limitée, et, si la limite est dépassée, l'étincelle jaillit et la lame de verre est percée.

195. **Électricité libre et électricité dissimulée.** — Lorsqu'on opère comme nous l'avons dit pour charger le conducteur, le fluide négatif, qui est attiré à la face interne de B (*fig.* 123) et développé par l'influence du fluide positif de A, à une distance représentée par l'épaisseur de la lame de verre, est, par cela même, en quantité moindre que ce fluide positif; d'autre part, il n'attire à la face interne de A qu'une quantité de fluide positif moindre que sa quantité propre; donc, pour ces deux raisons, il n'y a qu'une fraction du fluide de A qui soit maintenue à sa face interne, l'autre partie étant distribuée sur tout le plateau. — Les physiciens ont caractérisé par des noms particuliers cette distribution du fluide sur le plateau collecteur, et le fluide lui-même a été considéré par certains d'entre eux comme étant à deux états différents. La portion de fluide qui est maintenue à la face interne de A, et dont la présence ne se manifeste par aucune action sur les corps extérieurs, est dite *dissimulée :* l'autre partie, qui est distribuée sur le reste du plateau, et qui peut agir sur les corps extérieurs, est dite *libre :* le plateau collecteur cesse de se charger quand la répulsion exercée par cette électricité libre, sur le fluide du conducteur, est égale à celle qu'exerce la source elle-même.

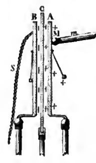


Fig. 123.

Pour constater que le plateau A seul contient de l'électricité libre, il suffit d'observer les petits pendules fixés aux faces externes des deux plateaux : celui de A diverge seul (*fig.* 123), celui de B reste au repos. — Cependant chacun des plateaux contient une charge considérable, car si l'on vient à les éloigner après les avoir isolés, on voit les deux pendules diverger (*fig.* 122); ils reviennent à la position indiquée par la figure 123 dès qu'on rapproche les plateaux de la lame de verre.

196. **Bouteille de Leyde.** — La bouteille de Leyde reproduit, avec une forme différente, les parties essentielles du condensateur à plateaux : c'est, de tous les condensateurs, le plus employé.

Une bouteille de verre ordinaire C (*fig.* 124) contient des feuilles d'or ou de clinquant A A; au milieu de ces feuilles vient plonger une tige métallique T, terminée en pointe à sa partie inférieure et maintenue dans le goulot de la bouteille par un bouchon verni à la gomme laque : une feuille d'étain B B est appliquée sur la surface extérieure de la bou-

teille, mais elle ne s'élève que jusqu'aux trois quarts environ de sa hauteur : le reste de la surface de la bouteille est couvert d'un vernis isolant. — Quand on prend la bouteille par la panse, la feuille d'étain ou *armature extérieure* est ainsi mise en communication avec le sol ; si maintenant on applique la tige T sur les conducteurs de la machine, cette tige et les feuilles d'or, qui forment l'*armature intérieure*, se chargeront d'électricité positive, comme le plateau A du condensateur à plateaux (*fig.* 123).

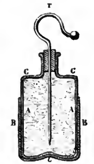


Fig. 124.

La théorie relative à la charge du condensateur à plateaux est complétement applicable à la bouteille de Leyde : quand on opère comme nous venons de l'indiquer, l'armature intérieure seule contient de l'électricité libre ; il y a de l'électricité condensée de chaque côté de la paroi de verre, aux surfaces qui sont en contact avec les deux armatures.

197. **Décharge successive d'un condensateur.** — Un condensateur ayant été chargé, et isolé ensuite de la source, si l'on approche le doigt du plateau A, qui contient de l'électricité libre et dont le pendule diverge, on en tire une petite étincelle, et le pendule retombe au repos. En même temps le pendule du plateau B diverge : donc, quand on enlève une partie du fluide dont la présence en A maintenait le fluide de B accumulé à la face interne, une partie du fluide de B devient libre. — Si l'on vient maintenant à toucher B, on obtient encore une petite étincelle, et le pendule de B retombe : en même temps le pendule de A diverge, ce qui s'explique comme précédemment, les rôles des deux plateaux étant simplement intervertis ; et ainsi de suite. — On désigne ce mode de décharge sous le nom de *décharge successive*.

En continuant de toucher alternativement les deux plateaux, on remarque que les divergences successives de l'un ou de l'autre pendule vont en diminuant sensiblement, et que les étincelles deviennent de plus en plus faibles. Donc, les quantités d'électricité qui deviennent libres, à chaque contact, vont toujours en décroissant. Comme on n'enlève d'ailleurs, à chaque fois, qu'une fraction du fluide restant, on conçoit qu'on ne puisse jamais décharger ainsi le conducteur d'une manière complète : l'expérience prouve en effet que, si l'air est bien sec, on peut répéter les contacts un très-grand nombre de fois, et obtenir toujours des étincelles sensibles.

La même expérience peut s'exécuter avec la bouteille de Leyde : en touchant successivement l'une et l'autre armature, on obtient des étincelles de plus en plus petites, mais qui continuent de se produire pendant un temps très-long, si la bouteille est bien isolée.

La disposition suivante, due à Franklin, permet à la décharge succes-

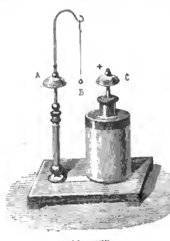


Fig. 125.

sive de s'effectuer d'elle-même. L'armature intérieure d'une bouteille de Leyde porte un timbre C (*fig.* 125); l'armature extérieure communique avec une tige métallique verticale, portant également un timbre A; entre les deux timbres est une petite balle métallique B, suspendue par un fil de soie. Cette petite balle est d'abord attirée par C; puis repoussée par C et attirée par A, et ainsi de suite : il se produit donc un carillon continu, jusqu'à ce que les fluides, successivement devenus libres, aient produit une neutralisation à peu près complète sur les deux armatures.

198. **Décharge instantanée.** — La décharge instantanée s'obtient en faisant communiquer les deux armatures d'un condensateur par un corps conducteur. — Si, par exemple, on touche avec une main l'un des plateaux d'un condensateur à plateaux chargé et qu'on approche l'autre main de l'autre plateau, on obtient une forte étincelle, et l'appareil est presque complétement déchargé. Il en est de même lorsque, tenant dans une main l'armature extérieure d'une bouteille de Leyde, on approche l'autre main de la tige qui termine l'armature extérieure. — Mais la combinaison des deux fluides à travers le corps humain produit toujours une commotion pénible, et peut même devenir dangereuse, avec un condensateur à grande surface et fortement chargé. On préfère alors employer,

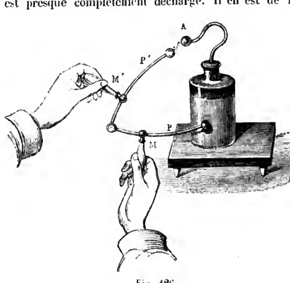


Fig. 126.

pour établir la communication entre les deux armatures, un *excitateur* (*fig.* 126) formé de deux arcs métalliques P, P′, articulés à charnière : pour plus de sûreté, on isole même l'arc métallique par des manches de verre M, M′, que l'on tient à la main.

Après une seule décharge, le condensateur n'est jamais ramené à un état complétement neutre : lorsque, au bout de quelque temps, on touche de nouveau les armatures avec l'excitateur, on obtient une nouvelle étincelle; de même encore, une troisième au bout de quelque temps, et ainsi de suite. La principale raison de ces *résidus* d'électricité est l'adhérence des fluides pour la lame isolante : nous allons voir en effet que les fluides condensés sont dans cette lame elle-même : ils ne l'abandonnent que lentement, pour se porter sur les armatures conductrices, quand celles-ci sont ramenées à l'état neutre.

199. **Dans un condensateur, les fluides développés résident sur les faces du corps isolant.** — Soit une bouteille de Leyde à *armatures mobiles* (*fig.* 127), c'est-à-dire dont l'armature intérieure A et l'armature extérieure B peuvent se séparer du verre intermédiaire C. Ces trois pièces étant placées l'une dans l'autre, chargeons

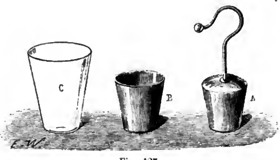


Fig. 127.

la bouteille et plaçons-la sur un plateau isolant; puis, enlevons avec la main l'armature intérieure, ce qui conduira son électricité dans le sol; retirons ensuite le vase de verre C, et mettons l'armature extérieure B en communication avec le sol. Si nous recomposons alors la bouteille, nous pourrons obtenir avec l'excitateur une décharge très-forte : l'électricité condensée était donc restée adhérente au verre lui-même.

200. **Batteries électriques.** — On donne le nom de *batteries* à des réunions de grosses bouteilles de Leyde ou *jarres* (*fig.* 128). Toutes les armatures intérieures sont réunies en D; les armatures extérieures communiquent par l'intermédiaire d'une feuille d'étain, qui garnit l'intérieur de la caisse C, et qui communique ordinairement elle-même avec la poignée extérieure D. — Pour charger la batterie, il suffira de mettre

les armatures intérieures en communication avec une machine électrique, et les armatures extérieures en communication avec le sol par une chaîne métallique.

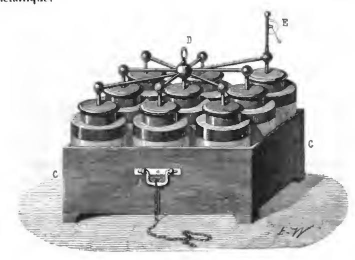


Fig. 128.

201. **Électromètre condensateur.** — L'électromètre condensateur, qui est dû à Volta, n'est autre chose qu'un électroscope à feuilles d'or (190), dans lequel la partie supérieure de la tige est garnie d'un condensateur. Cette tige porte en effet un plateau métallique horizontal A (*fig.* 129), dont la face supérieure est couverte d'une couche mince de vernis à la gomme laque; sur ce plateau, on en pose un second B, dont la face inférieure est couverte de ce même vernis : ces deux plateaux et le vernis qui les séparent constituent le condensateur. — L'appareil ainsi construit sert à reconnaître la nature de l'électricité d'une source à très-faible tension : pour cela, on le charge au moyen de cette source elle-même, comme il suit. La source est mise en communication avec la face supérieure du plateau B, tandis qu'on touche A avec

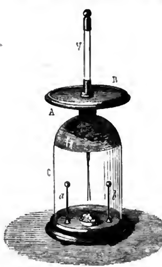


Fig 129. — Électromètre condensateur.

la main : il y a alors accumulation du fluide de la source sur B, jusqu'à ce que l'électricité libre ait une tension égale à celle de la source elle-même; en même temps, le fluide de nom contraire est condensé en A. On enlève ensuite le plateau B par le manche de verre qu'il porte en son centre, et le fluide accumulé en A se répand sur la tige et sur les feuilles. Il ne reste plus alors qu'à reconnaître la nature du fluide dont l'instrument est resté chargé, fluide qui est contraire à celui de la source : on y parviendra sans peine en approchant de A un corps chargé d'une électricité connue. — Au moyen de cet appareil, on peut étudier des sources d'électricité qui n'auraient aucune action sensible sur l'électroscope ordinaire : on conçoit en effet que, l'épaisseur des couches de vernis qui séparent les plateaux A et B étant très-faible, la force condensante doive être considérable.

202. **Effets des décharges électriques.**— Les décharges électriques produisent, dans les corps qu'elles traversent, des actions diverses, parmi lesquelles se manifestent, avec plus ou moins d'intensité selon les circonstances, des effets *mécaniques, calorifiques, lumineux, chimiques* et *physiologiques*.

1° *Effets mécaniques.* — Une lame de verre C (*fig.* 130) étant placée entre deux pointes métalliques, on fait passer la décharge d'une bouteille de Leyde entre ces deux pointes, en mettant en communication la chaîne B avec l'armature extérieure de la bouteille, et touchant la boule A avec l'armature intérieure : la décharge laisse un trou dans le verre.

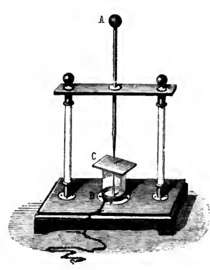


Fig. 130.

De même, en faisant passer la décharge d'une batterie puissante au travers d'un morceau de bois bien sec, on le fait voler en éclats.

C'est d'ailleurs à l'ébranlement mécanique produit dans l'air qu'est dû le *bruit* de l'étincelle, dans les circonstances ordinaires.

2° *Effets calorifiques.* — En traversant des fils métalliques fins, les décharges y déterminent une élévation de température qui peut aller jusqu'à les volatiliser. — Le même effet se produit quand la décharge se propage dans une feuille d'or très-mince; c'est ce qui donne lieu à l'expérience connue sous le nom de *portrait de Franklin.* Dans un carton B

(*fig.* 131), on a pratiqué des découpures représentant grossièrement le portrait de Franklin : sur ce carton, on applique une feuille d'or, de manière que ses bords touchent les deux petites lames métalliques F, F'; on la maintient en rabattant sur elle les deux cartons A, C. On place alors le carton B sur un ruban de soie blanche, et on presse le tout entre deux plaques de bois P. On fait passer la décharge d'une forte batterie entre les lames F, F' : les particules d'or volatilisées traversent les découpures, et l'on trouve sur le ruban de soie le portrait de Franklin, imprimé par les parcelles d'or.

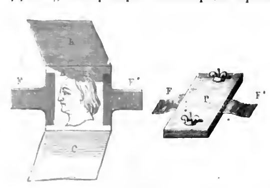


Fig. 131.

3° *Effets lumineux.*— Les étincelles qui jaillissent des machines électriques et des condensateurs, au travers de l'air et des corps mauvais conducteurs, sont des preuves suffisantes des effets lumineux des décharges. — Quand une machine fonctionne sans qu'il y ait, en présence de ses conducteurs, de corps assez voisins pour en tirer des étincelles, il se produit des ***aigrettes*** lumineuses, qu'on distingue dans l'obscurité, sur les parties les plus saillantes, et qui sont accompagnées d'un craquement presque continu : ce ne sont évidemment que des décharges de la machine vers les corps éloignés. — Dans d'autres circonstances, elles se transforment en une simple ***lueur*** qui se manifeste aux extrémités des conducteurs, sans production d'aucun bruit.

Le ***tube étincelant*** (*fig.* 132) est destiné à produire simultanément un grand nombre d'étincelles. C'est un tube de verre sur la surface intérieure duquel on a collé de petits losanges de clinquant, dont les pointes sont en regard les unes des autres, et qui sont disposés en spirale dans toute la longueur : les losanges extrêmes communiquent avec les montures métalliques A, B. Lorsqu'on met l'une des montures en communication avec le sol, et qu'on approche l'autre monture des conducteurs de la machine, on voit, à chaque décharge, des étincelles jaillir à la fois dans les intervalles de tous les losanges.

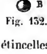


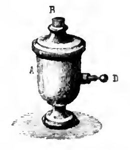
Fig. 132.



Le *carreau étincelant* est une lame de verre sur laquelle on a appliqué une bande d'étain très-étroite et faisant un grand nombre de zigzags : le métal a été ensuite enlevé en divers points, de manière à déterminer des solutions de continuité dont l'ensemble forme un dessin. Lorsqu'on met l'une des extrémités de la bande en communication avec le sol, et qu'on approche l'autre d'une machine électrique, on voit jaillir, dans toutes les solutions de continuité, des étincelles qui font apparaître le dessin dans l'obscurité.

On a encore étudié les effets lumineux des décharges dans un espace vide, par exemple dans le tube que représente la figure 132, et dont les montures métalliques portent de petites tiges intérieures, destinées à faire passer les décharges. Lorsque, après avoir fait le vide aussi bien que possible, on met l'une des montures en communication avec la machine, et l'autre avec le sol, on voit apparaître une traînée de lumière rougeâtre, dans tout l'espace qui sépare les deux tiges. Si l'on approche la main de l'un des points du verre, on voit la bande lumineuse se diriger vers ce point, ce qui prouve que les fluides répandus dans ces espaces raréfiés peuvent encore agir par influence sur les corps conducteurs placés dans le voisinage.

4° *Effets chimiques.* — Le passage d'une décharge peut déterminer la combinaison chimique de deux corps mélangés : c'est ce que démontre l'expérience du ***pistolet de Volta***. Un vase métallique A (*fig.* 133), dont la paroi est traversée par une tige métallique D, E, mastiquée dans un tube de verre qui l'isole, est rempli avec un mélange de deux volumes d'hydrogène et de 1 volume d'oxygène, puis fermé avec un bouchon B. On fait jaillir une étincelle entre la paroi métallique et la tige qui se termine intérieurement en E : les deux gaz se combinent pour former de la vapeur d'eau, et, sous l'influence de la haute température qui se produit, le bouchon est violemment projeté.



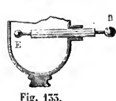


Fig. 133.

Une série d'étincelles, traversant un mélange d'azote et d'oxygène en présence d'une solution de potasse, produisent de l'acide azotique, et, par suite, de l'azotate de potasse. — Au contraire, sous l'influence d'une série d'étincelles, l'ammoniaque est décomposée en azote et hydrogène, l'acide carbonique en oxyde de carbone et oxygène, etc.

5° *Effets physiologiques.* — La décharge électrique, quand elle se fait à travers nos organes, y produit une commotion qui dépend de son inten-

sité. Les commotions produites par les condensateurs sont toujours beaucoup plus violentes que celles des machines proprement dites. — La commotion d'une bouteille de Leyde peut être ressentie à la fois par un grand nombre de personnes se tenant par la main, de manière à former une chaîne continue : la première prend à la main la panse de la bouteille, la dernière vient toucher l'armature intérieure. — Avec la décharge de batteries puissantes, on a pu obtenir des commotions assez fortes pour tuer, sur le coup, des animaux d'assez grandes dimensions.

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

203. **État électrique de l'atmosphère et des nuages.** — L'atmosphère est toujours chargée d'électricité *positive*, quand le temps est serein. C'est ce qu'on peut constater en modifiant un peu l'électroscope à feuilles d'or (*fig.* 116), comme l'a fait de Saussure. Il suffit de remplacer la boule qui surmonte la tige par une pointe métallique effilée, pour constater que l'appareil se charge, sous l'influence de l'électricité de l'atmosphère, de fluide positif : le fluide négatif attiré s'écoule alors par la pointe, et les feuilles restent chargées du même fluide que l'atmosphère. — En même temps, le sol et les corps qui sont à sa surface sont chargés d'électricité *négative*, comme on peut s'en assurer en plaçant le même électroscope sous un arbre ou sous un édifice.

Les nuages sont aussi chargés d'électricité : les nuages orageux surtout sont remarquables par la tension qu'ils possèdent. Ces faits, soupçonnés d'abord par Franklin, furent constatés bientôt par de nombreuses expériences. — En 1752, Dalibard, sur les indications de Franklin, fit élever, à Marly-la-Ville, une barre de fer de 40 pieds de haut, terminée à sa partie supérieure par une pointe d'acier, et fixée inférieurement sur un support isolant. Lorsque des nuages orageux venaient passer au-dessus de la tige, elle acquérait une charge électrique considérable, et donnait des étincelles quand on en approchait un fil de cuivre, tenu par un manche isolant et communiquant avec le sol. — A peu près à la même époque, Franklin lui-même eut l'idée de lancer dans les airs, au milieu de la plaine de Philadelphie, un cerf-volant surmonté d'une pointe métallique, et de le diriger vers des nuages orageux : la corde de chanvre était isolée de l'opérateur par un cordon de soie. Dans les premiers moments, le chanvre étant peu conducteur, on n'obtint que des traces douteuses d'électricité; mais une pluie fine étant venue le mouiller et le rendre conducteur, Franklin put tirer de la corde des étincelles de plusieurs pouces. — Une expérience semblable, faite en 1753 à Nérac, par de Romas, auquel les résultats obtenus par Franklin étaient inconnus, donna des effets plus puissants encore : la corde du cerf-volant ayant été entourée d'un fil de cuivre, il en fit jaillir des lames de feu de dix pieds de long, dont le

bruit était comparable à celui d'un coup de pistolet. — De pareilles expériences ne doivent être faites qu'avec les plus grandes précautions : ces décharges sont foudroyantes et peuvent tuer instantanément l'expérimentateur qu'elles viennent frapper.

Les nuages sont chargés tantôt de fluide positif, tantôt de fluide négatif. — C'est ce dont on peut se rendre compte en remarquant qu'un nuage formé au milieu de l'atmosphère doit être chargé d'électricité positive, comme l'air lui-même. — Au contraire, un brouillard qui se produit à la surface du sol, et qui, en s'élevant, forme un nuage, doit être électrisé négativement. — Enfin un nuage très-élevé et chargé d'électricité positive, peut agir par influence sur un nuage placé au-dessous de lui, et le charger d'électricité négative.

204. **Tonnerre.** — La *foudre* n'est autre chose qu'une décharge qui éclate soit entre deux nuages, soit entre un nuage et la terre. *L'éclair* est le phénomène lumineux qui l'accompagne : le *tonnerre* est le bruit produit par l'ébranlement de l'atmosphère environnante.

Les éclairs offrent le plus souvent l'aspect de sillons lumineux, en forme de zigzags, franchissant parfois des distances de 15 à 20 kilomètres.

On désigne sous le nom de *foudre globulaire* un phénomène resté jusqu'ici sans explication, et dont nous devons nous contenter d'indiquer les particularités principales. Les récits les plus authentiques signalent l'apparition, dans les temps d'orage, de globes lumineux se dirigeant lentement vers la terre, rebondissant sur le sol, et se divisant parfois en plusieurs globes plus petits; tantôt ils disparaissent sans faire explosion; tantôt, au contraire, ils éclatent avec fracas, brisant tout ce qui se trouve dans le voisinage.

Le bruit du tonnerre ne nous arrive jamais que quelques secondes après la lueur de l'éclair : cet intervalle entre les deux phénomènes tient à ce que le son parcourt seulement 340 mètres environ par seconde, tandis que la lumière met un temps inappréciable à nous parvenir. Aussi peut-on évaluer approximativement la distance des nuages orageux, par le temps qui s'écoule entre l'apparition de l'éclair et le coup de tonnerre qui suit. — Le roulement du tonnerre doit être attribué, tantôt aux échos produits par les objets situés à la surface de la terre ou par les nuages eux-mêmes; tantôt à la production simultanée de plusieurs décharges, entre plusieurs nuages situés à des distances différentes : dans ce dernier cas, on conçoit que ces décharges, mettant des temps inégaux pour nous parvenir, sont perçues par notre oreille comme si elles étaient successives.

Lorsque la foudre éclate entre un nuage électrisé et le sol, on dit que *la foudre tombe*. Elle frappe de préférence les points qui offrent des saillies par rapport aux corps environnants : les montagnes, les clochers, les

arbres isolés au milieu des plaines; aussi n'est-ce jamais dans le voisinage de ces abris qu'on doit se réfugier dans les temps orageux.

Quant aux effets de la foudre, ils ressemblent à ceux des décharges de nos machines électriques et des condensateurs, et ne s'en distinguent guère que par leur grandeur. — Ce sont des effets ***mécaniques***, arrachant et transportant les pierres, et déchirant en filaments le tronc des arbres; des effets ***calorifiques***, rougissant et fondant les fils de sonnettes ou les dorures, et mettant le feu aux matières combustibles; des effets ***chimiques***, donnant lieu à la formation d'acide azotique et d'azotate d'ammoniaque dans les pluies d'orage; des effets ***physiologiques***, amenant quelquefois les lésions les plus graves, et d'autres fois la mort sans lésion apparente.

Il arrive enfin que l'homme ou les animaux soient victimes de la foudre, sans en être directement frappés : c'est le phénomène qu'on a désigné sous le nom de ***choc en retour***. — Supposons qu'un nuage fortement électrisé et chargé, par exemple, d'électricité positive, passe à une petite distance du sol : il décompose par influence le fluide neutre des objets qui sont à la surface de la terre, attire le fluide négatif et repousse le fluide positif. Pendant que cette influence s'exerce, s'il arrive que le nuage se décharge tout à coup sur un autre point, il s'opère une recomposition subite des fluides dans les corps influencés : de là, chez les animaux, une commotion qui peut déterminer instantanément la mort.

205. **Paratonnerre.** — Lorsqu'une pointe métallique, communiquant avec le sol, est dirigée vers un corps quelconque électrisé et en particulier vers un nuage, que nous supposerons chargé, par exemple, d'électricité positive, le fluide neutre de cette pointe et des corps voisins est décomposé par influence. Le fluide positif est repoussé dans le sol, et le fluide négatif afflue vers l'extrémité de la pointe, qui le laisse échapper : ce fluide négatif vient neutraliser l'électricité du nuage, en sorte que tout se passe comme si la pointe soutirait le fluide positif du nuage pour le conduire dans le sol. — Cette façon d'envisager le pouvoir des pointes, signalée par Franklin, l'a conduit à l'établissement des ***paratonnerres*** qui sont destinés à préserver les bâtiments des ravages de la foudre.

Les conditions dans lesquelles un paratonnerre doit être installé, pour être le plus efficace possible, ont été l'objet de recherches multipliées de la part des savants. Les conclusions auxquelles ils sont parvenus peuvent être résumées comme il suit :

Si le paratonnerre se compose, comme c'est l'ordinaire, d'une tige de fer de 8 à 10 mètres de longueur, on doit la munir d'une pointe de cuivre à sa partie supérieure. La base de la tige doit être mise en communication avec le sol au moyen d'un ***conducteur*** qui sera, soit une tige de fer carrée ayant environ 2 centimètres de côté, soit un câble de fils de fer, qu'on aura couvert d'un vernis de goudron pour éviter l'oxydation. — Le

conducteur doit communiquer avec toutes les pièces métalliques du bâtiment qui offriront des dimensions un peu considérables, afin que les fluides développés dans ces pièces, par l'influence des nuages, puissent s'échapper par la pointe du paratonnerre. — Si plusieurs paratonnerres sont installés sur un même édifice, tous leurs conducteurs doivent être mis en communication par des tiges métalliques intermédiaires.

L'un des points les plus importants à considérer, dans l'établissement d'un paratonnerre, est la communication de l'extrémité inférieure du conducteur avec le sol. Il est indispensable que cette communication se fasse par une masse d'eau un peu considérable, et s'étendant assez loin dans le sol, comme l'eau d'un puits ou d'une source. Les citernes, dont les parois sont imperméables à l'eau, sont un mauvais moyen de communication : la braise de boulanger, dont on enveloppe quelquefois les ramifications des conducteurs, est également insuffisante. — La surface de contact entre l'eau et l'extrémité du conducteur doit être aussi étendue que possible : pour cela on contourne le fer en hélice, ou l'on y cloue des manchons de feuilles de tôle.

On admet généralement, comme un fait d'expérience, qu'un paratonnerre préserve de la foudre les objets qui sont autour de lui dans un cercle dont le rayon est double de la hauteur de la tige.

Un paratonnerre diminue d'ailleurs aussi la tension des nuages dont il subit l'influence ; il peut ainsi sauvegarder les lieux voisins, sur lesquels les mêmes nuages viendront à passer plus tard.

CHAPITRE II.

Attraction qui s'exerce entre l'aimant et le fer — Pôle des aimants. — Procédés d'aimantation.
Aiguille aimantée. — Définir la déclinaison et l'inclinaison. — Boussole.

MAGNÉTISME.

206. Attraction qui s'exerce entre l'aimant et le fer. — Substances magnétiques. — On donne le nom d'*aimants* aux substances qui possèdent la propriété d'attirer le fer.

L'*aimant naturel* ou *pierre d'aimant* est un oxyde de fer, auquel on donne en chimie la formule Fe^3O^4, et qu'on appelle encore oxyde magnétique.

En soumettant des barreaux d'acier à des traitements qui seront étudiés dans la suite, on leur communique la propriété d'attirer le fer : ils prennent alors le nom d'*aimants artificiels*. — Cette propriété ne peut, par aucun procédé, être communiquée d'une manière permanente au fer parfaitement pur, qui reçoit le nom de *fer doux*.

Le fer n'est pas le seul corps qui soit attirable à l'aimant : quelques au-

tres métaux, tels que le nickel, le cobalt, le chrôme, le sont également. On leur donne le nom de *substances magnétiques*.

207. **Pôles des aimants.** — Quand on plonge un barreau aimanté, ou un aimant quelconque, dans de la limaille de fer, on remarque que les grains de limaille s'attachent en filaments autour de deux points P, P' (*fig.* 134), situés au voisinage des extrémités, et qu'on nomme les *pôles*. Ces filaments deviennent d'autant plus courts qu'on s'approche davantage du milieu, et, sur la ligne médiane M N, on ne voit plus se fixer de limaille : la région MN est ce qu'on nomme la *ligne neutre* [1].

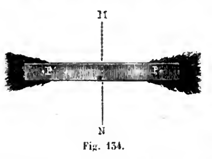


Fig. 134.

De ce que nous venons de dire il résulte que, dans l'action d'un aimant sur la limaille de fer, tout se passe comme si les pôles seuls avaient la propriété d'attirer la limaille, la force attractive développée allant en diminuant à mesure qu'on s'éloignerait de ces points. — Les mêmes conclusions ressortent de l'expérience suivante : on place un barreau aimanté au-dessous d'une feuille de carton horizontale A B (*fig.* 135), qui

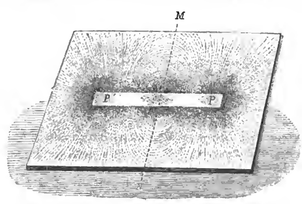


Fig. 135.

le couvre entièrement, et, au moyen d'un tamis, on laisse tomber une pluie de limaille de fer sur cette feuille, d'une certaine hauteur : on voit

[1] Les aimants naturels ou les barreaux mal aimantés présentent quelquefois dans leur longueur plusieurs centres d'attraction, séparés par des régions inactives. — Ces points ont reçu le nom de *points conséquents*; les causes qui en déterminent la formation sont encore mal connues.

es grains se grouper de manière à dessiner le contour du barreau, comme l'indique la figure : ils forment, autour des pôles P, P′, de longs filaments qui convergent vers chacun de ces points, et dont quelques-uns vont, en se courbant en arcades par-dessus la ligne médiane, rejoindre le pôle opposé. — Au-dessus de la ligne médiane elle-même se trouve un peu de limaille de fer, qui est restée où elle était tombée, sans paraître éprouver d'attraction.

208. **Distinction des deux pôles, au moyen de l'action exercée par la terre sur un aimant.** — Un barreau aimanté étant suspendu horizontalement par un fil sans torsion (*fig.* 136), et abandonné à lui-même, on le voit, après quelques oscillations, prendre une direction fixe, qui est à peu près celle du nord au sud, et à laquelle il revient toujours quand on l'en écarte. — Si l'on vient maintenant à retourner le barreau, de manière à diriger vers le sud celui de ses deux pôles qui s'était tourné vers le nord, et réciproquement, et qu'on l'abandonne de nouveau, on le voit faire une demi-révolution, et revenir, après quelques oscillations, à sa position primitive. Cette dernière remarque montre que les deux pôles ne sont pas identiques : nous les nommerons *pôle nord* et *pôle sud*.

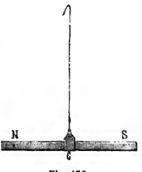


Fig. 136.

209. **Action réciproque des pôles de deux aimants. — Hypothèse des deux fluides.** — Soit une aiguille aimantée dont on aura déterminé le pôle nord N et le pôle sud S (*fig.* 137) : lorsqu'on

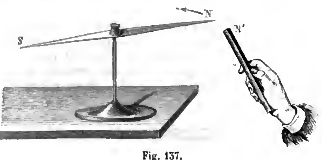


Fig. 137.

présente au pôle nord N le pôle nord N′ d'un barreau aimanté, on observe une répulsion. De même le pôle sud S′ repousse le pôle sud S. — Au contraire, le pôle nord N′ attire le pôle sud S.

Donc, *deux pôles de même nom se repoussent*, et *deux pôles de noms contraires s'attirent.*

De là résulte que, si un barreau aimanté M' est suspendu horizontalement au-dessus d'un autre barreau fixe M (*fig.* 138), l'équilibre ne peut exister que s'il vient se placer parallèlement à M, les pôles de noms contraires étant en regard. On peut donc assimiler l'action de la terre sur un aimant mobile à celle d'un barreau fixe, qui serait orienté sensiblement du nord au sud. Cet aimant fictif a reçu le nom d'*aimant terrestre :* la théorie conduit à regarder ses deux pôles comme situés l'un et l'autre au voisinage du centre de la terre. — On nomme *pôle boréal* de cet aimant fictif celui qui est situé dans l'hémisphère boréal; *pôle austral*, celui qui est dans l'hémisphère austral.

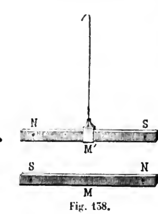


Fig. 138.

Par suite, si l'on considère un barreau aimanté en équilibre à la surface de la terre, et qu'on veuille appliquer à ses deux pôles des dénominations semblables, on remarquera que ces pôles doivent être placés en sens inverse de ceux de l'aimant terrestre. On nommera donc *pôle austral* celui que nous avons déjà appelé pôle nord, et *pôle boréal* celui que nous avons appelé pôle sud.

Il est commode, pour expliquer les phénomènes du magnétisme, d'admettre, comme nous l'avons fait pour l'électricité, deux *fluides magnétiques*, tels que chacun d'eux repousse le fluide de même nom et attire le fluide de nom contraire. — Ces deux fluides, qu'on suppose développés aussi dans l'aimant terrestre, ont reçu les noms de *fluide austral* et *fluide boréal.*

210. **Aimantation par influence.** — Lorsque l'un des pôles d'un aimant, le pôle austral A, par exemple, est placé à une petite distance d'un barreau de fer doux, on constate que celui-ci devient un aimant lui-même, sous l'influence du premier : ses deux extrémités *a*, *b* (*fig.* 139) attirent la limaille de fer; de plus, en leur présentant successivement un même pôle d'une aiguille aimantée, on constate que l'extrémité *b*, voisine de A, contient un pôle boréal, et que l'extrémité *a* contient un pôle austral. — Il est donc naturel d'admettre que le fer

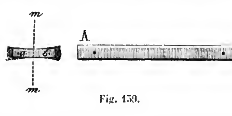


Fig. 139.

doux contenait. avant l'expérience, les deux fluides également distribués en tous ses points, et que l'approche du pôle A, repoussant le fluide austral et attirant le fluide boréal, a suffi pour donner à ces fluides le même mode de distribution que dans un aimant véritable.

Dès lors aussi, l'attraction du pôle A sur le pôle *b* l'emportant sur la répulsion des pôles A et *a*, à cause de la différence des distances à laquelle ces actions s'exercent, le barreau de fer tout entier est sollicité vers le pôle A. — Telle est, dans la théorie des deux fluides, l'interprétation naturelle de l'attraction du fer doux, par chacun des pôles d'un aimant.

Il faut ajouter enfin qu'un morceau de fer doux, tel que *a b*, qui est aimanté par influence, peut exercer lui-même une action semblable sur un autre morceau de fer doux. C'est ainsi qu'on peut suspendre au pôle d'un aimant une file de barreaux de fer, dont chacun s'aimante sous l'influence de celui qui le précède.

Lorsqu'on supprime l'aimant dont l'influence séparait les fluides du fer doux, ceux-ci obéissent à leurs actions mutuelles, et le fer retombe à l'état neutre.

211. **Aimantation permanente de l'acier. — Force coercitive.** — Un barreau d'acier trempé, placé dans les mêmes conditions que le barreau de fer doux *ab* (*fig.* 139), ne manifeste d'abord aucune trace d'aimantation par influence. Ce n'est qu'au bout d'un temps très-long, et en le soumettant à des chocs répétés pendant qu'il est en présence de AB, qu'on peut voir s'y développer des pôles. Mais, en revanche, une fois qu'on lui a communiqué ainsi une aimantation sensible, il la conserve même après qu'on l'a éloigné de A B.

Ces résultats s'expliquent l'un et l'autre, si l'on admet que l'acier trempé se distingue du fer doux par la résistance qu'éprouvent les fluides à s'y mettre en mouvement. Quand il est à l'état neutre, les fluides ne se séparent qu'avec une grande difficulté, et après un temps assez long; mais, l'aimantation une fois développée, ils n'obéissent que très-difficilement aux actions qui tendraient à ramener l'état neutre. — On appelle *force coercitive* cette résistance que l'acier trempé oppose aux changements de distribution des fluides magnétiques.

212. **Expérience des aimants brisés.** — Soit une aiguille d'a-



Fig. 140.

cier aimantée AB (*fig.* 140), dont nous aurons déterminé le pôle austral A

le pôle boréal B, en faisant usage, par exemple, d'un autre aimant mobile sur un pivot (*fig.* 137). Brisons cette aiguille suivant sa ligne neutre N : nous constaterons que chacun des fragments attire la limaille de fer par ses deux extrémités, et que le fragment de droite a un pôle austral en A et un pôle boréal en B' : le fragment de gauche a de même un pôle austral en A', un pôle boréal en B. Si l'on vient à briser de même l'un de ces fragments AB', chacun des fragments partiels devient encore un aimant complet, présentant deux pôles et une ligne neutre, et ainsi de suite. — D'après cette expérience, il est impossible d'admettre que, par le fait de l'aimantation de l'aiguille AB, le fluide austral et le fluide boréal se soient transportés l'un dans la moitié gauche, l'autre dans la moitié droite.

Coulomb admet, pour expliquer ces résultats, que les fluides se meuvent dans de petits espaces qu'il nomme ***éléments magnétiques***. Chaque élément contient naturellement et ***conserve toujours*** des quantités égales de l'un et de l'autre fluide : l'aimantation a seulement pour résultat de modifier leur distribution dans les éléments successifs, de telle manière que la résultante des actions exercées par ces fluides, sur un corps extérieur, se réduise à deux forces passant, l'une par un point situé vers l'extrémité gauche de l'aiguille, l'autre par un point situé vers l'autre extrémité. — On peut alors s'expliquer, sans difficulté, l'apparition de nouveaux pôles dans les fragments d'un aimant brisé. En effet, chaque fragment comprend toujours un certain nombre d'éléments magnétiques, dans lesquels la distribution des fluides est restée semblable à ce qu'elle était dans l'aimant total : la résultante des actions de ces fluides peut donc se réduire encore à deux forces, appliquées en deux points voisins des extrémités du fragment, en sorte que celui-ci peut encore avoir deux pôles.

PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

213. **Méthode de la simple touche.** — La méthode de la *simple touche*, applicable, par exemple, à l'aimantation des aiguilles, consiste à frotter perpendiculairement l'aiguille à aimanter sur l'extrémité d'un barreau puissant, en la faisant glisser suivant sa longueur et toujours dans le même sens. Si l'on a employé, par exemple, le pôle austral du barreau, il se forme un pôle boréal dans la moitié de l'aiguille qui est arrivée la dernière au contact de cette extrémité. — Ce procédé ne développe jamais qu'une aimantation peu énergique.

214. **Méthode de la touche séparée.** — Pour appliquer la méthode de la *touche séparée*, on installe solidement, sur un plan horizontal, deux aimants puissants AM, BM' (*fig.* 141), qu'on sépare par une règle de bois L, de telle façon que les extrémités de la pièce à aimanter s'appuient

sur leurs pôles de noms contraires A, B. On appuie deux barreaux aN, bN' sur le milieu de la pièce à aimanter, en plaçant leurs pôles a et b respectivement du même côté que les pôles A et B des aimants fixes, et les inclinant de manière que leurs directions fassent, de part et d'autre, des angles d'environ 30 degrés avec l'horizon : on les fait alors glisser en sens contraire, chacun vers l'une des extrémités. On enlève ensuite les deux barreaux, on les reporte au milieu, et on recommence un certain nombre de fois la même opération, avec les mêmes précautions. — Il est aisé de voir que, pendant cette opération, les quatre barreaux agissent simultanément, pour donner à la pièce une aimantation de même sens : avec la disposition indiquée sur la figure, son pôle austral sera en a et son pôle boréal en b. — On peut ainsi communiquer, par exemple, aux aiguilles de boussole et aux lames d'acier un peu minces, une aimantation assez énergique : il est bon d'ailleurs d'exercer les frictions successivement sur les deux faces.

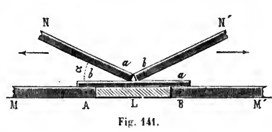


Fig. 141.

215. **Méthode de la double touche.** — La pièce à aimanter étant installée sur deux aimants fixes AM, BM' (*fig.* 142), comme dans la méthode précédente, et les deux barreaux aN et bN' étant séparés par une petite cale de bois, on les fait glisser ensemble, et *sans les séparer*, vers l'une des extrémités de la pièce, puis vers l'autre, et ainsi de suite : on termine l'opération en revenant de l'extrémité opposée à celle vers laquelle on s'est dirigé d'abord, et s'arrêtant au milieu. Le pôle austral et le pôle boréal se développent respectivement en a et b, comme l'indique la figure. — Ce procédé est beaucoup plus énergique que les deux précédents, mais il développe souvent des points conséquents.

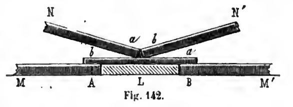


Fig. 142.

216. **Aimantation à saturation. — Influence de la trempe et de la température.** — L'intensité magnétique acquise par un barreau d'acier, sous l'action de telle ou telle méthode, est assez variable, dans les premiers instants, avec la méthode dont on a fait usage; mais

cette intensité diminue, en général, dans les instants qui suivent, et le barreau arrive à un même état permanent, quelle que soit la méthode employée : on dit alors qu'il est aimanté *à saturation*.

Quant aux conditions desquelles dépend l'intensité magnétique à saturation, la principale semble être le degré de dureté qu'on a donné à l'acier par la trempe. — En général, un même barreau peut acquérir, à saturation, une intensité magnétique d'autant plus grande qu'il a été trempé plus dur, c'est-à-dire qu'il a été trempé à une température plus élevée. Au contraire, un même barreau, trempé d'abord très-dur et recuit ensuite à différentes température, puis aimanté à saturation après chaque recuit, acquiert une intensité magnétique d'autant moindre que le recuit a eu lieu à une température plus haute.

Après l'aimantation, les variations de température ont encore une influence sur l'intensité magnétique. — De petites variations de température ne font varier que passagèrement l'intensité; mais un aimant porté au rouge perd, d'une manière définitive, toute trace d'aimantation.

217. Armures et contacts des aimants. — Les *armures* des aimants sont des pièces de fer doux, qu'on laisse en présence des aimants d'une manière permanente, afin de combattre autant que possible les causes diverses qui tendent à diminuer l'aimantation. — Ainsi, pour conserver les barreaux aimantés, on les place, deux par deux, dans une même boîte, parallèlement et les pôles de noms contraires en regard les

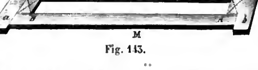


Fig. 143.

uns des autres (*fig.* 143). On interpose de petites cales de bois, pour s'opposer à leur rapprochement, et on applique sur leurs deux extrémités de petites pièces de fer doux *ab*, *ab* : ces armures s'aimantent, sous l'influence concordante des deux barreaux; leur aimantation réagit à son tour sous les fluides des barreaux, et tend à conserver l'intensité magnétique.

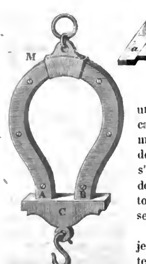


Fig. 144.

Les aimants naturels sont ordinairement assujettis entre des armures de fer doux, qui y restent constamment fixées, et qui ont le même effet.

On donne le nom de *contact* à une pièce de fer doux C, qui s'applique à la fois sur les deux pôles des aimants en *fer à cheval* (*fig.* 144); elle sert à maintenir séparés

les fluides de l'aimant, et aussi à suspendre des poids qu'on lui fait supporter. L'action de chacun des pôles sur cette pièce tendant à accroître l'aimantation développée par l'autre, l'aimant peut alors porter une charge qui dépasse de beaucoup le double des poids que supporterait un seul pôle. — L'expérience montre d'ailleurs que, si l'on a soin de *nourrir* l'aimant, c'est-à-dire d'augmenter progressivement les poids qu'il soutient, on peut arriver à une charge totale de plus en plus considérable. — Cependant, si l'on dépassait brusquement la charge limite que l'aimant peut porter, de manière à détacher le contact, l'intensité magnétique deviendrait tout à coup moindre qu'elle n'était primitivement : il faudrait recommencer à le nourrir, avec une charge beaucoup moindre, pour lui rendre peu à peu sa force.

MAGNÉTISME TERRESTRE.

218. **Aiguille aimantée. — Définition de la déclinaison et de l'inclinaison.** — Lorsqu'un aimant est assujetti de manière à se mouvoir librement dans un plan horizontal, autour de son milieu, il se place, sous l'action de la terre, dans une position telle que la ligne de ses pôles prenne une direction déterminée, voisine de la ligne nord-sud. — On appelle *méridien magnétique* le plan vertical qui passe par la ligne des pôles d'un semblable aimant, lorsqu'il est en équilibre.

Pour déterminer le méridien magnétique, il est peu commode de se servir de barreaux aimantés, dont la largeur rend toujours un peu incertaine la position exacte de la ligne des pôles. On emploie plutôt des aiguilles taillées en forme de losange (*fig.* 157), et portées par un pivot vertical, sur lequel elles s'appuient par une petite chape d'agate fixée en leur milieu. On peut alors supposer, sans grandes chances d'erreur, que la ligne des pôles coïncide avec la ligne des pointes NS. — Ces aiguilles sont en acier : on les a d'abord *trempées* à une haute température, puis *recuites* à une température moins élevée, pour ne leur laisser qu'une force coercitive convenable (216) : on les a ensuite aimantées. Pour distinguer les deux pôles l'un de l'autre, on conserve ordinairement, sur la moitié qui se dirige vers le nord, la teinte bleu foncé que l'aiguille tout entière a prise pendant le recuit, et qui est due à une oxydation superficielle : on enlève cet oxyde dans la moitié qui se dirige vers le sud.

Une semblable aiguille, mobile dans un plan horizontal autour de son milieu, ne prend pas, en général, rigoureusement la direction du nord au sud : elle fait avec elle un angle AON (*fig.* 145), qu'on appelle la *déclinaison* du lieu. — On voit d'ailleurs que cet angle mesure l'angle dièdre formé par le méridien magnétique et le méridien géographique.

La déclinaison d'un lieu est dite *orientale* lorsque le pôle austral de

l'aiguille se porte à l'est du méridien magnétique : *occidentale,* lorsque le pôle austral se porte à l'ouest du méridien magnétique.

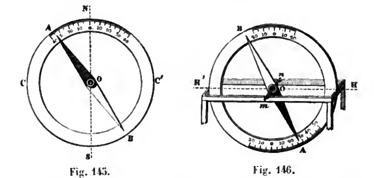


Fig. 145. Fig. 146.

Soit maintenant une aiguille aimantée AB (*fig.* 146), mobile dans un plan vertical autour d'un axe horizontal *mn* qui la traverse en son milieu. — Si l'on oriente le plan que décrit l'aiguille dans le méridien magnétique, l'expérience montre que, dans la plupart des points du globe, l'aiguille prend une direction inclinée BA. — On nomme ***inclinaison*** d'un lieu ***l'angle aigu*** AOH ***que fait la moitié australe d'une aiguille aimantée, mobile dans le plan du méridien magnétique, avec la ligne horizontale*** H'H ***menée dans ce plan.***

219. **Boussoles.** — Lorsqu'on connaît, au moyen des observations astronomiques par exemple, le méridien géographique d'un lieu, on emploie, pour déterminer successivement la déclinaison et l'inclinaison de ce lieu, des instruments qu'on désigne sous le nom de ***boussole de déclinaison*** et ***boussole d'inclinaison.*** — D'après la définition même de la déclinaison, la boussole de déclinaison doit se composer essentiellement d'une aiguille aimantée, parfaitement mobile autour de son milieu, et d'un cercle horizontal gradué CC' dont le centre coïncidera avec le milieu de l'aiguille (*fig.* 145). On orientera ce cercle de manière que le diamètre passant par le zéro soit dans le méridien magnétique ; et la position de l'aiguille donnera, au moyen d'une simple lecture, la déclinaison AON du lieu. — La ***boussole d'inclinaison*** se compose essentiellement d'une aiguille mobile autour d'un axe horizontal *mn* (*fig.* 146), et d'un cercle gradué vertical dont le centre est exactement sur l'axe de rotation de l'aiguille. On oriente le plan du cercle dans le méridien magnétique, ce qui est facile si l'on connaît le méridien géographique et la déclinaison du lieu. La position de l'extrémité australe de l'aiguille donne, au moyen d'une simple lecture, l'inclinaison HOA du lieu.

Inversement, on emploie la ***boussole marine*** pour déterminer le méri-

dien magnétique ou la direction nord-sud en un lieu dont on connaît la déclinaison. — Cette boussole, dont la construction se rapproche beaucoup de celle de la boussole de déclinaison, se compose d'une aiguille aimantée mobile sur un pivot vertical, au centre d'une boîte qui se place toujours d'elle-même dans une position horizontale, malgré les oscillations du navire : ce dernier résultat s'obtient au moyen d'une suspension de Cardan. Une ligne fixe a été tracée sur le fond de la boîte, c'est la *ligne de foi*, qu'on installe dans la direction de la quille du navire; une lame horizontale circulaire de talc, portant une division en degrés et la rose des vents, est fixée à l'aiguille elle-même. On peut donc observer, à chaque instant, l'angle que fait la ligne de foi avec l'aiguille, c'est-à-dire l'angle formé par la quille du navire avec le méridien magnétique. Si donc on connaît la déclinaison du lieu, il suffit de l'ajouter à l'angle observé, ou de l'en retrancher, selon les cas, pour obtenir l'angle que fait l'axe du navire avec le méridien géographique : on reconnaît ainsi si le navire marche dans la direction qu'il doit suivre, et on peut, au besoin, l'y ramener.

220. Variations de la déclinaison et de l'inclinaison, en un même lieu. — La déclinaison d'un lieu déterminé est soumise à des variations continuelles. Pendant l'intervalle d'une même journée, on voit, dans nos climats, l'extrémité australe de l'aiguille marcher de quelques minutes vers l'ouest pendant la matinée, et jusqu'à l'heure du maximum de température; elle revient ensuite sur elle-même, quand la température s'abaisse. Ces écarts sont plus grands pendant la saison chaude que pendant l'hiver.

En évaluant chaque année, à Paris, depuis 1580, la déclinaison moyenne *annuelle*, on a constaté que cette moyenne a subi des variations remarquables. En 1580, la déclinaison était *orientale* et égale à 11°,30'; la déclinaison moyenne annuelle a été en diminuant jusqu'en 1663, où elle est devenue nulle; elle est alors devenue *occidentale* et a été en croissant jusqu'en 1814, où elle a atteint un maximum égal à 22°,24'; depuis cette époque, elle a été en décroissant, et en 1861, la déclinaison occidentale moyenne a été de 19°,26',5. — Ces variations, constatées également dans les autres points du globe où l'on a pu faire des observations suivies, ont reçu le nom de *variations séculaires :* les données que nous possédons à cet égard ne sont pas encore assez nombreuses pour qu'on en puisse conclure la loi à laquelle elles sont soumises.

Enfin, on a donné le nom de *variations accidentelles* ou *d'orages magnétiques* à de véritables perturbations, survenant brusquement dans les mouvements de l'aiguille aimantée. Des recherches suivies, et faites en des points distribués sur toute la surface du globe, semblent déjà indiquer que ces orages ne sont pas locaux, mais qu'ils apparaissent simultanément en un grand nombre de points : des observations très-multi-

pliées pourront seules jeter quelque lumière sur la véritable cause de ces phénomènes.

L'inclinaison éprouve des variations semblables à celles de la déclinaison, mais leur amplitude est toujours moins considérable. — Leur valeur absolue est d'ailleurs moins bien connue, et plus difficile à évaluer, à cause des frottements de l'axe de rotation de l'aiguille sur ses supports. — En 1861, l'inclinaison moyenne à Paris a été de 66°,7',2.

CHAPITRE III.

Galvanisme. — Expériences de Galvani, de Volta.— Piles de Volta, de Daniell, de Bunsen. Effets mécaniques, calorifiques, lumineux et chimiques de la pile. Galvanoplastie. — Dorure, argenture.

GALVANISME. — PILE DE VOLTA.

221. **Première expérience de Galvani.** — L'expérience célèbre de Galvani qui le conduisit, en 1786, à la découverte de cette branche de l'électricité qu'on désigne sous le nom de ***galvanisme***, est ordinairement reproduite dans les cours sous la forme suivante :

Une grenouille ayant été récemment tuée, on coupe en deux la colonne vertébrale, vers la région lombaire, et l'on dépouille toute la partie du corps qui est au-dessous de cette section : on prend alors un arc métallique COZ (*fig.* 147) formé d'un fil de cuivre C et d'un fil de zinc Z, qu'on réunit en O. On engage l'un de ces fils C sous le faisceau des nerfs lombaires, comme le montre la figure, et alors, dès qu'on vient à toucher, avec l'autre fil Z, les muscles de l'une des cuissses, on voit celle-ci se contracter. Avec certaines grenouilles, le même phénomène peut être reproduit pendant plusieurs heures. — Dans l'expérience telle qu'elle se présenta d'abord à Galvani, les membres inférieurs d'un certain nombre de grenouilles avaient été suspendus à un balcon de fer par des crochets de cuivre qui traversaient la moelle épinière; Galvani se proposait d'observer l'influence qu'exerceraient sur elles les décharges produites entre des nuages orageux; il reconnut que les membres s'agitaient, même en l'absence de tout orage, chaque fois que le vent amenait les muscles au contact des barreaux de fer.



Fig. 147.

Galvani expliqua ces contractions en considérant les muscles comme de véritables condensateurs, assimilables à la bouteille de Leyde ; pour lui, ces condensateurs étaient chargés naturellement d'un fluide électrique à l'intérieur, c'est-à-dire dans les points où pénètrent les nerfs, et de fluide contraire à l'extérieur : l'arc métallique jouait donc simplement le rôle d'un excitateur, qui produisait la décharge en mettant en communication les deux armatures. La décharge une fois effectuée, chacun des fluides se reproduisait presque instantanément. — Cependant, une étude plus attentive des conditions du phénomène ayant paru indiquer quelques différences entre ces fluides et les fluides électriques ordinaires, on leur donna le nom de *fluides galvaniques*, et cette partie nouvelle de la science prit le nom de *galvanisme*.

222. **Expériences de Volta.** — En reproduisant l'expérience de Galvani et en variant les conditions, Volta fut amené à considérer comme nécessaire l'emploi de deux métaux différents, pour former l'arc métallique, et à proposer une théorie nouvelle, d'après laquelle l'électricité se produirait, en général, au contact de deux corps de natures différentes, par une *force électro-motrice* spéciale. Les fluides, séparés en O (*fig.* 147), se recombineraient ensuite à travers les muscles et les nerfs ; de là les contractions observées.

Pour démontrer la production des fluides électriques au contact de métaux de natures différentes, Volta fit les expériences suivantes : Une lame de zinc Z ayant été soudée à une lame de cuivre C, il prit à la main l'extrémité zinc, et appliqua l'extrémité cuivre sur le plateau supérieur de l'électroscope condensateur (*fig.* 148). Le plateau inférieur ayant été mis en communication avec le sol, il observa que l'appareil se chargeait comme avec une source d'électricité négative : d'après sa théorie, le contact du zinc et du cuivre, au point de soudure, développe donc une force électro-motrice qui charge le cuivre d'électricité négative. — Prenant alors la lame par l'extrémité cuivre, et touchant l'électroscope

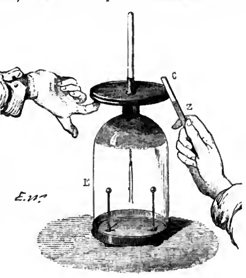


Fig. 148.

avec l'extrémité zinc, il n'observa pas de charge sensible : c'est que, suivant la même théorie, la lame de zinc étant placée entre le cuivre qui lui est soudé et le cuivre du plateau, les deux forces électro-motrices agissent en sens contraire et produisent un effet résultant nul. Au contraire, si, dans cette même expérience, on place, entre le zinc et le plateau, une feuille de papier mouillée avec de l'eau acidulée, la lame agit sur l'électroscope comme une source d'électricité positive : selon Volta, la feuille de papier, empêchant alors le contact direct entre le cuivre du plateau et le zinc, et ne donnant d'ailleurs naissance elle-même qu'à une force électro-motrice très-faible, permet à la force électro-motrice qui se développe au point de soudure de se manifester : elle agit ensuite comme un conducteur, transmettant au plateau l'électricité positive du zinc.

225. **Développement d'électricité par les actions chimiques.** — Si les résultats des expériences précédentes sont incontestables, il n'en est pas de même des deux théories émises, l'une par Galvani, l'autre par Volta · l'une et l'autre ont donné lieu aux objections les plus sérieuses, et sont en contradiction avec les résultats de quelques autres expériences non moins certaines. — Aussi a-t-on cherché à expliquer le développement d'électricité autrement que par la théorie du contact.

L'expérience montre que, si l'on plonge une lame métallique dans un acide qui puisse l'attaquer, par exemple une lame de zinc dans de l'acide sulfurique étendu, le métal se charge d'électricité négative; il suffit, pour s'en convaincre, de mettre la lame de zinc en communication avec un électroscope condensateur. En même temps, le liquide se charge d'électricité positive, comme on le reconnaît en y plongeant un corps moins attaquable que le zinc, une lame de cuivre par exemple, et mettant cette lame de cuivre en communication avec l'électroscope. — Or il est aisé de voir que, dans les expériences de Volta, on n'a précisément observé de développement d'électricité que dans les cas où il a pu se produire une action chimique semblable. Dans la première expérience, l'humidité acide dont les mains sont toujours imprégnées suffit pour charger le zinc d'électricité négative, que le cuivre transmet à l'électroscope : Volta a d'ailleurs observé lui-même que la charge de l'instrument est beaucoup plus forte quand les doigts sont imprégnés d'eau acidulée ; quant au fluide positif développé dans le liquide, il s'écoule dans le sol par le corps de l'expérimentateur. Dans la seconde expérience, il n'y a pas d'électricité développée, et, tant qu'on n'interpose pas de papier acidulé entre le zinc et le plateau, il ne peut y avoir, en effet, aucune action chimique; mais, dès que le papier imprégné d'eau acidulée est placé entre le plateau de l'électroscope et le zinc, le liquide se charge d'électricité positive qu'il transmet au plateau, et le fluide négatif déve-

loppé dans la lame de zinc s'écoule dans le sol par le cuivre et par le corps de l'expérimentateur.

De même, dans l'expérience de Galvani (221), le développement d'électricité qui produit les contractions de la grenouille doit être attribué principalement à l'action des liquides animaux, sur le métal le plus attaquable de l'arc par lequel on réunit les nerfs et les muscles. — Nous devons ajouter cependant que, d'après les travaux des physiciens modernes, la grenouille ne se comporterait pas absolument comme un simple électroscope : elle peut également produire une certaine quantité d'électricité, mais cette quantité n'intervient certainement que pour une très-faible part dans la production des contractions observées par Galvani.

224. **Pile de Volta.** — Quoi qu'il en soit de la valeur de la théorie de Volta, elle l'a conduit à imaginer une pile, construite dès 1794, et qui doit être considérée comme l'origine de toutes les autres. — Volta formait une colonne verticale en superposant successivement (*fig.* 149) un disque de cuivre *c*, un disque de zinc *z*, et une rondelle de drap D imprégnée d'eau acidulée : il répétait ensuite un certain nombre de fois la même succession, et terminait par un disque de zinc. Afin de mieux assurer le contact du cuivre et du zinc, il soudait ensemble les disques de cuivre et de zinc contigus, dont l'ensemble constituait ce qu'il appelle un *couple*.

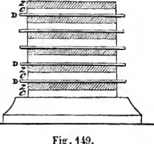


Fig. 149.

Or, si la pile ainsi construite est bien isolée, l'expérience montre que l'extrémité zinc est chargée d'électricité positive, et l'extrémité cuivre d'électricité négative. — Quant à la tension des deux extrémités, s'il y a vingt couples, elle est sensiblement égale à vingt fois la tension que posséderaient respectivement les deux métaux d'un couple isolé, dans les mêmes conditions. Ces deux extrémités de la pile prennent le nom de *pôles*.

225. **Actions chimiques produites dans la pile de Volta.** — En ayant égard aux actions chimiques qui se produisent dans cette pile, on se rend facilement compte du sens dans lequel les fluides sont séparés. L'électricité se produisant par l'action de l'eau acidulée sur le zinc, le zinc inférieur *z* se charge de fluide négatif, et le liquide de la rondelle de drap D se charge de fluide positif, qu'il communique au disque de cuivre suivant : il en est de même à chacune des surfaces de contact du zinc avec l'eau acidulée, et il suffit d'admettre que les fluides séparés, dans toute l'étendue de la pile, par toutes ces actions simultanées, soient conduits, en sens contraire, jusqu'à ses extrémités, pour

concevoir que l'extrémité inférieure, dans la figure actuelle, devienne un *pôle négatif*, et l'extrémité supérieure un *pôle positif*. — Mais il est facile de voir également que le cuivre inférieur pourrait être supprimé sans qu'il y eût rien de changé à la charge de la pile, puisque ce cuivre joue simplement le rôle d'un conducteur qui recueille l'électricité du zinc : de même le zinc supérieur, qui n'est pas en contact avec l'eau acidulée, recueille simplement l'électricité que le cuivre a reçue du liquide de la rondelle humide, et il peut également être supprimé. — Aussi construit-on souvent la pile de Volta en supprimant ces deux disques extrêmes, et l'on emploie comme lames terminales deux disques simples (*fig.* 150), l'un de zinc Z, qui est le *pôle négatif*, l'autre de cuivre C, qui est le *pôle positif*. — Il est d'ailleurs toujours facile de se souvenir que c'est *du côté du dernier métal attaqué par l'acide* que se forme le pôle négatif.

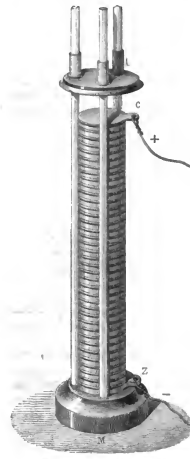


Fig. 150. — Pile de Volta.

226. **Courant électrique. — Sens du courant.** — Si l'on adapte un fil métallique à chacun des disques extrêmes de la pile de Volta (*fig.* 150), et qu'on approche ces deux fils l'un de l'autre, on obtient, chaque fois qu'on les met en contact ou qu'on les sépare, une étincelle : donc, quand on effectue la combinaison des fluides accumulés aux deux extrémités, il s'en reproduit instantanément une quantité nouvelle. — Dès lors, si l'on réunit les deux fils de manière à établir une communication permanente entre les deux pôles, il se fait dans ces fils une recomposition continuelle des fluides mis en liberté dans la pile, et une reproduction incessante de ces mêmes fluides. Le mouvement continu auquel ces actions donnent naissance a reçu le nom de *courant électrique :* il est d'ailleurs manifesté par un grand nombre de phénomènes qui seront étudiés plus loin.

Avec les théories acceptées aujourd'hui, il faut admettre que le fluide positif circule, dans le fil interpolaire, du pôle positif au pôle négatif de la pile ; et que, en même temps, le fluide négatif circule, dans le même fil, en sens contraire. Cependant, pour la commodité du langage, et pour distinguer nettement l'une de l'autre les deux extrémités d'un conducteur parcouru par un courant électrique, on est convenu d'appeler *sens du courant* le sens dans lequel se meut le fluide positif. — Nous regarderons donc, à l'avenir, le courant comme allant *du pôle positif au pôle négatif, dans la partie du circuit extérieure à la pile.*

MODIFICATIONS DE LA PILE DE VOLTA.

227. **Pile à auge.** — La pile de Volta a l'inconvénient de se dessécher assez promptement, à cause de la pression exercée sur les rondelles humides; aussi perd-elle très-rapidement de son intensité. La pile à auge (*fig.* 151), imaginée par Cruikshank, n'est qu'une pile de Volta placée

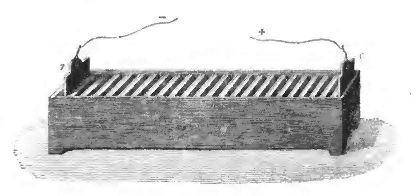


Fig. 151. — Pile à auge.

horizontalement : les couples métalliques, formés chacun d'une lame de zinc et d'une lame de cuivre soudées ensemble, sont placés verticalement dans une auge, et les rondelles de drap mouillé sont remplacées par les petites couches intermédiaires de l'eau acidulée qu'on verse dans l'auge elle-même : aux extrémités, sont une lame de cuivre et une lame de zinc, qui forment le pôle positif et le pôle négatif, comme il a été dit plus haut (225).

228. **Pile de Wollaston.** — Dans la pile de Wollaston, les différentes lames de zinc sont plongées chacune dans un vase séparé, contenant de l'eau acidulée. Une lame de cuivre C (*fig.* 152), repliée de ma-

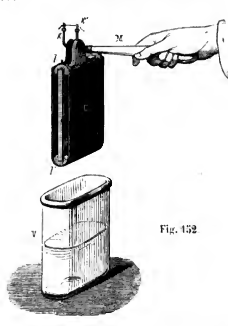


Fig. 152

nière à se trouver en présence des deux faces de la lame de zinc, complète avec elle l'*élément* de pile, et de petites cales de bois *l*, *l'*, maintiennent ces deux lames à une certaine distance. — Lorsque le système est plongé dans le liquide du vase V, le zinc attaqué par l'acide sulfurique se charge de fluide négatif, et la lame de cuivre recueille le fluide positif qui se produit dans le liquide, des deux côtés de la lame de zinc.

Avec un certain nombre d'éléments semblables (*fig.* 153), on forme une pile en réunissant, par une lame métallique, le zinc de chaque élément au cuivre de l'élément suivant : le pôle négatif est toujours au

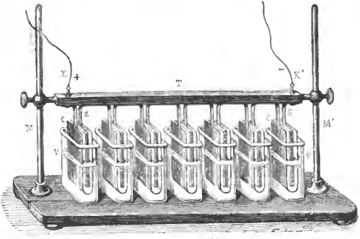


Fig. 153. — Pile de Wollaston.

dernier zinc. Afin de pouvoir plus facilement mettre tous les éléments à la fois en activité, et arrêter ensuite l'action, on les fixe tous à une même

traverse de bois que l'on peut faire monter ou descendre le long des tiges M, M'.

229. **Pile de Münch.** — La pile de Münch (*fig.* 154) n'est guère qu'une modification de la pile de Wollaston, dans laquelle les éléments,

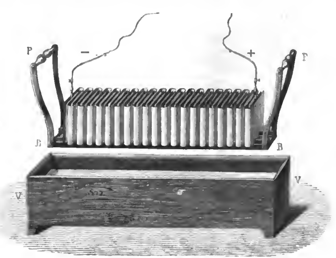


Fig. 154. — Pile de Münch.

présentant d'ailleurs quelques différences avec ceux de Wollaston, quant à leur emboîtement réciproque, sont assujettis entre des traverses de bois, de manière qu'on puisse les plonger tous à la fois dans une même auge. Deux poignées P, P' permettent de retirer en un instant la pile du liquide, et d'arrêter l'action de l'acide sur le zinc.

PILES A DEUX LIQUIDES.

230. **Piles à deux liquides, à courant constant.** — Lorsqu'on fait fonctionner pendant quelque temps les piles précédentes, on observe toujours une diminution graduelle dans l'intensité des effets qu'elles produisent. — Cette diminution doit être attribuée à l'appauvrissement progressif du liquide en acide, et aussi à la présence des bulles de gaz hydrogène, qui proviennent de la décomposition de l'eau c'est ce que va nous prouver l'étude des piles à deux liquides, en montrant que, dans ces piles, les modifications qui tendent à faire disparaître ces deux effets tendent en même temps à rendre le courant constant.

231. **Pile de Daniell.** — L'élément de pile de Daniell, qui a été modifié de plusieurs façons diverses, se réduit, sous sa forme la plus

simple, aux éléments suivants. Une lame de zinc Z (*fig.* 155), amalgamée à sa surface et repliée de manière à former une sorte de manchon, plonge dans un vase V contenant de l'acide sulfurique étendu d'eau : une lame de cuivre C est placée au centre du vase; mais, au lieu de plonger directement dans l'acide sulfurique, elle est placée dans un vase de terre poreuse D, qui plonge lui-même dans l'acide sulfurique et qui contient une solution saturée de sulfate de cuivre. La paroi du vase D forme ainsi, entre les deux liquides, une cloison à travers laquelle ils ne se mélangent que très-difficilement. La lame de zinc est le pôle négatif, la lame de cuivre le pôle positif. — Le zinc amalgamé a sur le zinc ordinaire, entre autres avantages, celui de ne pas être attaqué tant que la communication entre les deux pôles n'est pas établie : le métal et l'acide ne sont donc pas inutilement consommés.



Fig. 155. — Élément de pile de Daniett.

Voici maintenant les réactions principales qui se passent dans un semblable couple. — Dès que le circuit est fermé, l'eau est décomposée par le zinc, en présence de l'acide sulfurique : l'oxygène se porte sur le zinc, et l'oxyde produit se combine avec l'acide sulfurique pour former du sulfate de zinc. L'hydrogène, mis en liberté, se porte du côté de l'autre pôle. et, rencontrant la solution de sulfate de cuivre, il se substitue au métal de ce sel, en donnant naissance à un dépôt de cuivre qui va se former sur la lame de cuivre intérieure. La présence du sulfate de cuivre a donc pour premier effet d'empêcher le dégagement gazeux, autour du pôle positif. — En outre, pour un équivalent d'acide sulfurique employé à former du sulfate de zinc, il y a un équivalent d'hydrogène transporté sur le sulfate de cuivre, et, par suite, un équivalent d'acide sulfurique hydraté est reproduit : la liqueur ne s'appauvrit donc pas en acide, pourvu qu'on ait soin d'entretenir la solution de sulfate de cuivre à l'état de concentration : c'est ce à quoi on parvient en y maintenant sans cesse des cristaux de sulfate de cuivre. — Quant à l'accroissement du sulfate de zinc dans le vase extérieur, il n'est pas nécessaire de s'en préoccuper, si la pile ne doit pas fonctionner pendant un temps très-considérable; dans

ce dernier cas, on l'enlève avec un siphon, et on le remplace par de l'eau acidulée.

232. **Pile de Bunsen.** — Dans l'élément de pile de Bunsen (*fig.* 156), le pôle négatif est encore une lame de zinc amalgamée Z, plongeant dans un vase V qui contient de l'acide sulfurique étendu; le pôle positif est un cylindre de *charbon de cornue* C, placé au centre d'un vase poreux D qui contient lui-même de l'acide azotique. — Le charbon de cornue est un charbon qui se forme dans les cornues où l'on distille la houille, pour préparer le gaz d'éclairage : il est inattaquable par les acides, et conducteur de l'électricité.

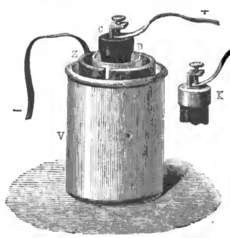


Fig. 156. — Élément de pile de Bunsen.

Ici, comme dans l'élément de Daniell, le zinc amalgamé n'est pas attaqué tant que le circuit n'est pas fermé. Mais, dès que la communication entre les deux pôles est établie, le zinc, en présence de l'acide sulfurique, décompose l'eau : il se forme du sulfate de zinc. L'hydrogène, mis en liberté, se porte vers le pôle positif et agit sur l'acide azotique, auquel il enlève une partie de son oxygène, pour former de l'eau. L'acide azotique est ainsi transformé en combinaisons d'oxygène et d'azote moins riches en oxygène, et parmi lesquelles domine l'acide hypoazotique, qui se dissout dans le liquide. Les dégagements gazeux sont donc évités.

On ne prend, comme on le voit, aucune précaution contre la disparition graduelle de l'acide sulfurique libre; aussi, les piles formées avec ces éléments ne conservent-elles pas leur intensité pendant un temps aussi long que les piles de Daniell. — La pile de Bunsen convient plus particulièrement aux expériences où l'on veut avoir un courant très-énergique, et conservant une intensité à peu près constante pendant quelques heures.

EFFETS PRODUITS PAR LES COURANTS.

233. **Effets calorifiques des courants.** — Les courants produisent, dans les corps qu'ils traversent, une élévation de température d'autant plus grande que ces corps leur offrent une résistance plus considé-

rable. — Lorsqu'on ferme le circuit d'une pile au moyen d'un fil métallique fin, ce fil devient incandescent; et, si l'on diminue progressivement la longueur du fil que le courant doit traverser, on peut arriver à le fondre.

Pour produire des effets de ce genre, l'expérience montre que les conditions les plus favorables sont celles où l'on opère avec des éléments offrant une surface assez considérable, tels que ceux de Wollaston. A défaut d'éléments offrant une grande surface, on peut placer parallèlement plusieurs éléments de Bunsen, que l'on réunit par les pôles de même nom: on conçoit facilement que dix éléments réunis de cette manière se comportent comme un seul élément qui aurait une surface dix fois plus considérable.

234. **Effets lumineux. — Lumière électrique.** — Soient deux cônes de charbon de cornue P. N (*fig.* 157), assujettis dans des montures métalliques isolées, auxquelles on pourra adapter les fils qui communiquent avec les pôles d'une pile. Lorsqu'on approche lentement les deux charbons l'un de l'autre, on constate qu'il faut les amener presque au contact pour obtenir une étincelle; mais, dès que cette étincelle s'est produite, on peut les éloigner beaucoup plus, sans qu'il cesse de jaillir entre eux une lumière vive et continue.



Fig. 157.

Cette expérience, faite pour la première fois par Davy, est devenue l'origine de la *lumière électrique*, dont les usages acquièrent chaque jour une nouvelle importance. Mais, quelque compacts que soient les charbons employés, ils brûlent, et leurs extrémités se désagrégent pendant l'expérience, en sorte que, si l'on n'avait pas soin de les rapprocher, le courant serait sans cesse interrompu. — On a imaginé un grand nombre d'appareils *régulateurs*, destinés à effectuer d'eux-mêmes ce rapprochement des cônes, à mesure que leur intervalle tend à augmenter. Bien qu'on ne soit pas encore parvenu à donner à la lumière une constance absolue, on a pu l'employer utilement en plusieurs circonstances, soit dans les théâtres et dans les fêtes publiques, soit pour éclairer pendant la nuit des travaux de construction.

235. **Propriétés de l'arc voltaïque.** — Lorsqu'on place les charbons, entre lesquels jaillit la lumière électrique, en présence d'une lentille, de manière à projeter sur un écran l'image grossie des cônes incandescents, on observe que le cône positif se creuse beaucoup plus rapidement que l'autre : des particules de charbon sont arrachées, dont les unes brûlent dans l'air, les autres sont transportées sur l'extrémité du cône négatif. — Si l'on dépose un fragment de métal dans une cavité

pratiquée à l'extrémité du charbon positif, on constate que des particules métalliques en fusion viennent se rendre sur le charbon négatif, et la lumière prend une couleur qui dépend de la nature du métal employé. — Pour ces raisons, on est autorisé à penser que les charbons formant les deux pôles sont réunis par une sorte d'arc de particules matérielles, qui constitue un conducteur intermédiaire, et qui a reçu le nom d'*arc voltaïque*.

Cet arc est toujours à une température extrêmement élevée. Davy était déjà parvenu à y fondre du platine, du quartz, de la chaux, et à y brûler du diamant. — Despretz, en opérant dans le vide, a pu vaporiser dans l'arc voltaïque les diverses variétés de charbon, et le diamant lui-même : des baguettes de charbon ont été ramollies, au point de se courber et de se souder entre elles.

256. **Effets physiologiques des courants.** — Une pile énergique produit, au moment où l'on met ses deux pôles en communication avec les organes d'un animal vivant, ou avec les organes d'un animal mort depuis peu, une contraction musculaire d'autant plus forte que le courant est plus intense. La contraction se renouvelle au moment où l'on interrompt le circuit. — De ces deux contractions, que l'on observe, la première à l'instant de l'établissement du circuit, la seconde au moment de la rupture, l'une ou l'autre peut manquer de se produire, quand on opère avec des courants très-faibles ; mais, avec un courant assez intense, elles se produisent toutes deux, bien qu'avec des intensités différentes. — Elles sont accompagnées d'ordinaire, si l'on opère sur un animal vivant ou sur l'homme, d'une sensation plus ou moins pénible.

Ces effets deviennent très-puissants lorsqu'on fait usage de piles énergiques ; c'est ainsi qu'on a pu, en opérant sur des cadavres de suppliciés, faire entrer les muscles en contraction, de manière à produire tels ou tels mouvements. — La commotion d'une pile de Bunsen de cent éléments est déjà redoutable pour l'homme ; celles de piles plus puissantes peuvent aller jusqu'à foudroyer un bœuf.

EFFETS CHIMIQUES. — GALVANOPLASTIE.

257. **Décomposition de l'eau.** — La décomposition de l'eau par la pile peut être considérée comme le type des actions chimiques produites par les courants. — Un vase V (*fig.* 158) reçoit, par sa partie inférieure, deux fils de platine A, B, isolés dans une couche de résine : on verse, dans ce vase, de l'eau qu'on aiguise légèrement avec de l'acide sulfurique, afin de la rendre plus conductrice, et on place, au-dessus des fils A et B, de petites éprouvettes pleines d'eau, C, D. Dès qu'on fait communiquer les pôles de la pile avec les fils de platine, au moyen des petites colonnes métalliques P, P', on voit se produire à la surface des fils A, B,

une multitude de petites bulles gazeuses, qui s'élèvent dans les éprouvettes : du côté du pôle négatif, il se dégage seulement de l'hydrogène; du côté du pôle positif, seulement de l'oxygène. Si maintenant on mesure les volumes des deux gaz, en ayant soin de placer les petites cloches sur une cuve à eau où l'on puisse amener le niveau intérieur du liquide sur le même plan horizontal que le niveau extérieur, on constate que le volume de l'hydrogène est double de celui de l'oxygène. — Cet appareil, dans lequel la quantité de gaz produite, en un temps déterminé, peut servir de mesure à l'intensité du courant, a reçu le nom de *voltamètre*.

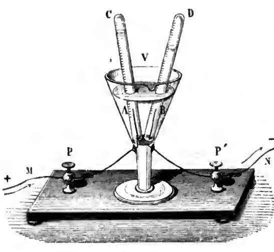


Fig. 158. — Voltamètre.

258. **Décomposition des combinaisons chimiques en général. — Corps électropositifs et électronégatifs. — Électrodes.** — La plupart des combinaisons chimiques subissent, quand on emploie un courant suffisamment intense, une décomposition semblable à celle de l'eau : or, les attractions électriques s'exerçant entre les corps chargés d'électricités contraires, on a été conduit à admettre que, au moment de la décomposition, les éléments qui se portent vers le pôle négatif sont chargés d'électricité positive; ceux qui se portent vers le pôle positif, d'électricité négative : on dit donc que les premiers sont *électropositifs*, les seconds *électronégatifs*. Mais il faut bien remarquer que ces expressions ne peuvent être appliquées à tel ou tel corps que relativement à certaines combinaisons, et non pas d'une manière absolue; en sorte qu'un corps peut se comporter comme électropositif vis-à-vis d'un corps déterminé, et comme électronégatif vis-à-vis d'un autre.

On nomme *électrolyse* l'analyse d'un corps composé, effectuée au moyen d'un courant; *électrode positive*, la surface par laquelle le courant entre dans le corps composé; *électrode négative*, celle par laquelle il en sort. — L'expérience montre que, dans toutes les décompositions de ce genre, les produits de l'électrolyse apparaissent exclusivement *au contact des électrodes*, et jamais dans l'intervalle qui les sépare.

239. Décomposition des oxydes et des composés binaires. — C'est en décomposant les alcalis par le passage d'un courant qu'on a pu démontrer la constitution binaire de ces corps. L'expérience, faite d'abord par Davy, a été modifiée par Seebeck, et peut s'effectuer de la manière suivante.— Dans un morceau de potasse caustique M (*fig.* 159), on pratique une cavité, de façon à y placer un globule de mercure N, dans lequel on plonge le fil qui vient du pôle négatif de la pile : le morceau de potasse est placé lui-même sur une lame de platine AB, qui communique avec le pôle positif. Si l'on a eu soin d'humecter un peu la potasse, on voit se former un amalgame de potassium en N, et il se dégage de l'oxygène au contact de la lame de platine.

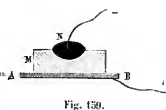


Fig. 159.

La plupart des oxydes, et des combinaisons binaires en général, peuvent être décomposés par le courant électrique, pourvu que la pile soit assez énergique et que ces corps eux-mêmes soient assez conducteurs. Lorsque les corps soumis à l'expérience ne sont pas liquides, on n'arrive, le plus souvent, à leur donner une faculté conductrice suffisante qu'à la condition de les dissoudre, soit dans l'eau, soit dans l'ammoniaque, ou de les fondre sous l'influence de la chaleur.

240. Décomposition des sels oxygénés. — Lorsqu'on fait passer un courant au travers d'une solution concentrée de sulfate de cuivre dans l'eau, et qu'on prend comme électrodes de petites lames de platine, on voit le cuivre se déposer sur l'électrode négative. En même temps, l'acide sulfurique et l'oxygène de la base se rendent au pôle positif : l'acidité de la liqueur se constate aisément au moyen d'un papier de tournesol, et on voit l'oxygène se dégager en petites bulles.

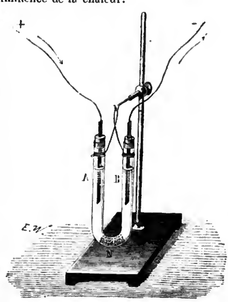


Fig. 160.

Si l'on fait la même expérience avec du sulfate de potasse, les résultats semblent d'abord tout autres : en pla-

çant dans un tube en U le liquide, après l'avoir préalablement coloré avec de la teinture de violette, et interposant en N (*fig.* 160) une petite couche de sable, afin de rendre plus difficile le mélange des liquides, on constate, autour de l'électrode négative B, un dégagement d'hydrogène, et l'apparition de la potasse qui verdit le sirop de violette; autour de l'électrode positive A, on obtient, comme avec le sulfate de cuivre, un dégagement d'oxygène, et de l'acide sulfurique qui rougit la teinture. — Il est aisé de voir que ces résultats peuvent être expliqués par une action toute semblable à celle que le courant exerce sur le sulfate de cuivre : en effet, si le potassium se rend au pôle négatif, comme s'y rendait le cuivre, ce métal, se trouvant en présence de l'eau, doit la décomposer en donnant naissance à de la potasse et à de l'hydrogène : c'est donc là une action purement secondaire, et postérieure à la décomposition par le courant lui-même.

241. Emploi d'une électrode positive soluble. — Les résultats de la décomposition d'un sel sont encore modifiés, au moins en apparence, quand on emploie, comme électrode positive, un métal pouvant entrer en combinaison avec les produits de la décomposition qui se portent à cette électrode. — Supposons, par exemple, qu'on décompose par un courant une solution de sulfate de cuivre, en prenant comme électrode positive une lame de cuivre; l'autre électrode sera formée par un corps conducteur quelconque. La décomposition du sel s'effectuant comme il a été indiqué, il se dépose du cuivre sur l'électrode négative: en même temps il se produit, sur la lame de cuivre qui forme l'électrode positive, des quantités d'oxygène et d'acide sulfurique correspondantes au poids du métal déposé, lesquelles attaquent le cuivre de cette électrode et reproduisent un poids de sulfate de cuivre égal à celui qui a été décomposé. La liqueur reste donc à l'état de concentration, et l'effet définitif est le même que si le cuivre, pris à l'électrode positive, était simplement transporté sur l'électrode négative. — Ces remarques trouvent leur application immédiate dans la galvanoplastie.

GALVANOPLASTIE — DORURE, ARGENTURE.

242. Galvanoplastie du cuivre. — Pour reproduire en cuivre l'une des faces d'une médaille, par galvanoplastie, on en prend d'abord l'empreinte au moyen d'alliage fusible, de cire ou de gutta-percha : cette empreinte, qui donne en creux les reliefs de la médaille et réciproquement, est placée à l'extrémité d'un fil communiquant avec le pôle négatif d'un élément de Bunsen, dans une cuve A (*fig.* 161) contenant une solution saturée de sulfate de cuivre : l'électrode positive est formée par une lame de cuivre rouge P : il se forme un dépôt de cuivre en N, comme il vient d'être dit (241), et en même temps il se dissout en P une égale quantité de même métal

Lorsque l'empreinte a été prise avec de l'alliage fusible, si on la plongeait dans le bain sans précaution préalable, le cuivre contracterait avec elle une grande adhérence : pour empêcher cette adhérence, on y dépose auparavant une mince couche de noir de fumée, en la passant sur une flamme fuligineuse. — Si elle a été prise avec de la cire ou de la gutta-percha, on rend sa surface conductrice en y déposant, avec un pinceau, une petite couche de plombagine.

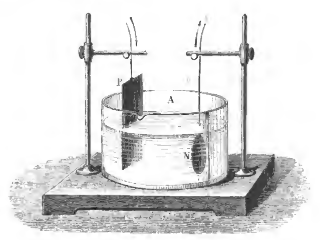


Fig. 161.

L'intensité du courant doit être réglée avec soin : un courant trop intense donnerait un dépôt cassant et même pulvérulent. — L'expérience a montré que la liqueur doit être légèrement acide.

Quand le dépôt se fait avec une lenteur convenable, il peut rendre jusqu'aux détails les plus délicats d'une planche gravée : de cette manière, on en peut obtenir des reproductions en cuivre, ou *clichés*, en nombre aussi grand qu'on le veut. Lorsque l'un de ces clichés a été usé par des tirages répétés, et qu'il ne donne plus que des épreuves insuffisantes, on peut le mettre de côté, pour en employer un autre qui vaudra ce que valait le premier, et ainsi de suite. — C'est ce qui a été fait pour le tirage des gravures de cet ouvrage.

Dans d'autres circonstances, on se propose de déposer sur des objets en relief, comme des statues, par exemple, un dépôt de cuivre qui doit y rester adhérent. — S'il s'agit d'une statue de plâtre, on la rendra imperméable au liquide, en la plongeant dans de la stéarine fondue : on rendra ensuite la surface conductrice, au moyen d'une couche de plombagine, et on placera la statue dans un bain de cuivre. Il faudra avoir soin de prendre comme électrode positive un système de plaques de cuivre, dis-

tribuées dans le bain de façon qu'il s'en trouve en face de tous les points de l'objet, et sensiblement à la même distance.

On emploie quelquefois, pour la galvanoplastie, une disposition qui fait de la cuve elle-même une sorte de pile de Daniell, dispensant de l'emploi d'une pile extérieure. Pour cela, au milieu de la solution concentrée de sulfate de cuivre, on place un ou plusieurs vases poreux, contenant chacun une lame de zinc amalgamé et de l'eau aiguisée d'acide sulfurique : on fait communiquer ensemble toutes ces lames, et on les réunit à une tige métallique, portant les empreintes ou les objets qui plongent dans le sulfate de cuivre. — D'après ce qui a été dit de la pile de Daniell, on voit que le dépôt de cuivre se formera sur ces objets comme il se forme sur le cuivre C de la figure 155.

243. **Dorure et argenture.** — La dorure et l'argenture galvaniques s'effectuent d'ordinaire au moyen de cyanures doubles d'or et de potassium, d'argent et de potassium, qui ont paru préférables pour cet usage à toutes les autres solutions.

Pour dorer ou argenter un objet de cuivre, une médaille par exemple, il est essentiel de débarrasser d'abord sa surface de toute matière étrangère. — Pour cela, on procède d'abord au *dérochage :* on chauffe la médaille de manière à décomposer, par la chaleur, toutes les matières grasses dont elle pouvait être souillée ; en même temps, le cuivre se couvre d'une légère couche d'oxyde. On le plonge, encore chaud, dans de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, qui enlève l'oxyde noir et ne laisse qu'un peu d'oxyde rouge; puis on lave à grande eau. — Vient alors le *décapage :* on plonge la pièce dérochée dans de l'acide nitrique faible; puis, pendant une ou deux secondes, dans de l'acide nitrique concentré; enfin, on la rince avec soin dans de l'eau pure.

La pièce ainsi préparée est portée au bain d'or ou d'argent : elle est placée au pôle négatif de la pile, au milieu de la solution de cyanures. Le pôle positif est formé par une lame d'or ou d'argent; en sorte que, à mesure que le métal se dépose sur la pièce, il est remplacé par une quantité équivalente, empruntée à l'électrode positive.

CHAPITRE IV.

Électro-magnétisme. — Expérience d'Œrsted. — Construction et usage du multiplicateur.
Expériences qui constatent l'action des courants sur les aimants, et l'action des courants sur les courants.
Solénoïdes. — Assimilation des aimants aux solénoïdes.

ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

244. **Expérience d'Œrsted.** — En plaçant un fil métallique dans une direction parallèle à une aiguille aimantée, mobile sur un pivot

fig. 162), Œrsted vit l'aiguille abandonner sa position d'équilibre, dès qu'on faisait passer un courant dans le fil.

Il observa que la déviation dépendait à la fois de la direction du courant et de sa position par rapport à l'aiguille : ainsi, lorsque le fil XY était placé au-dessus de l'aiguille (*fig.* 162), si le courant allait du sud au nord, le pôle austral de l'aiguille était dévié vers l'ouest ; si le courant allait du nord au sud, le pôle austral était dévié vers l'est.

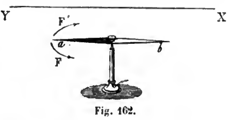


Fig. 162.

Au contraire, lorsqu'on plaçait le fil au-dessous de l'aiguille, si le courant était dirigé du sud au nord, le pôle austral de l'aiguille était dévié vers l'est : si le courant allait du nord au sud, le pôle austral était dévié vers l'ouest.

Œrsted dut se contenter de signaler ces faits, sans indiquer de loi générale qui permît de les relier entre eux.

245. **Loi d'Ampère.** — Les résultats précédents, et tous ceux qui peuvent se présenter quand on donne au courant des positions quelconques par rapport à l'aiguille, ont été réunis par Ampère dans l'énoncé suivant :

Un courant agissant sur un aimant tend à le placer dans une position perpendiculaire à la sienne, et de manière que le pôle austral soit à la gauche du courant. — Pour définir la *gauche du courant*, on doit supposer que l'observateur se place dans la direction même du conducteur, de façon que le courant entre par ses pieds et sorte par sa tête, son visage étant tourné du côté de l'aiguille : dans cette position, sa droite et sa gauche définissent la droite et la gauche du courant.

En reprenant les quatre résultats de l'expérience précédente d'Œrsted, on reconnaîtra sans peine que la loi précédente leur est applicable.

246. **Application de la loi d'Ampère à la détermination du sens d'un courant.** — La loi d'Ampère étant admise, pour déterminer le sens du courant qui se propage dans un fil, il suffira de présenter ce fil à une aiguille aimantée mobile sur un pivot, en le plaçant parallèlement à l'aiguille, c'est-à-dire dans le méridien magnétique. L'aiguille sera déviée, et, si l'observateur se suppose placé sur le fil, le visage tourné vers l'aiguille, et de façon que le pôle austral de l'aiguille se trouve à sa gauche, il saura que le courant est dirigé de ses pieds vers sa tête.

En effectuant cette expérience, on constate que les courants un peu intenses produisent seuls sur l'aiguille une déviation sensible, et qu'ils

l'écartent d'autant plus de sa position primitive que leur intensité est plus grande : les courants faibles ne produisent, au contraire, qu'un écartement de l'aiguille à peine appréciable. On conçoit en effet que, l'action de la terre tendant à maintenir l'aiguille dans le méridien magnétique, on n'observe ainsi que la résultante de cette action et de celle du courant. — Pour rendre l'aiguille sensible à l'action des courants d'une faible intensité, on a recours au *multiplicateur*.

247. **Construction du multiplicateur.** — Replions le fil conducteur en un rectangle ABCDF (*fig.* 163), placé dans le méridien magnétique, et au milieu duquel nous installerons l'aiguille aimantée : supposons que les flèches de la figure ci-contre indiquent le sens du courant, dans chacune des portions

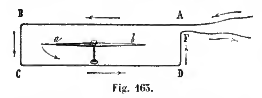


Fig. 163.

rectilignes AB, BC, CD, DF ; il est aisé de voir que chacune d'elles a sa gauche en avant du plan de la figure. Donc les actions des quatre côtés du rectangle concourent, pour tendre à porter le pôle austral en avant. — Concevons maintenant que, au lieu de former avec le fil un simple rectangle, on l'enroule un grand nombre de fois sur un cadre rectangulaire : tous les tours de fil, étant parcourus dans le même sens par le courant, agiront de la même manière sur l'aiguille, et, toutes choses égales d'ailleurs, l'action sera d'autant plus grande que le nombre des tours sera plus considérable.

Les tours de fil étant serrés les uns contre les autres, et formant sur le cadre plusieurs couches superposées, on aura eu soin de les couvrir de soie sur toute leur surface, avant de les appliquer sur l'appareil. Ils seront ainsi complétement isolés les uns des autres, et le courant sera forcé de parcourir le fil dans toute sa longueur. — L'aiguille aimantée, au lieu d'être mobile sur un pivot, pourra être suspendue à un fil de cocon ; on évitera ainsi les frottements que développerait le mouvement de l'aiguille sur son pivot.

248. **Galvanomètre à deux aiguilles.** — Employons enfin, au lieu d'une seule aiguille, deux aiguilles aimantées *ab*, *a′b′* (*fig.* 164), placées parallèlement, mais de manière que leurs pôles contraires se correspondent, et assujetties invariablement l'une à l'autre. — Ces aiguilles constituent un système *astatique*, c'est-à-dire que, si elles étaient parfaitement identiques, l'action résultante de la terre sur elles serait rigoureusement nulle : on voit en effet que, les pôles étant placés en sens inverse, les actions exercées par la terre se neutraliseraient, quelle que fût l'orientation. Mais, en réalité, l'une des aiguilles possède toujours

une aimantation un peu plus énergique, et la terre conserve sur le système une action directrice très-faible, égale à la différence des actions exercées sur chacune des aiguilles.

Cela posé, soit un fil conducteur replié en un rectangle ABCDF, dont les côtés sont dans le méridien magnétique; plaçons l'aiguille inférieure *ab* au milieu de ce rectangle, et l'aiguille supérieure *a' b'* au-dessus du côté supérieur AB. — Si le courant se propage dans le sens des flèches ci-contre, nous avons montré (247) que les quatre côtés du rectangle agissent sur l'aiguille intérieure de manière à solliciter le pôle austral *a* en avant du plan de la figure. Considérons maintenant l'action sur l'aiguille supérieure : en appliquant la loi d'Ampère, on voit que le côté le plus voisin AB tend à porter le pôle austral *a'* en arrière du plan de la figure, et par suite le pôle *b'*, qui correspond à *a*, en avant : cette action *concorde* donc avec celles qui s'exercent sur l'aiguille intérieure. Quant aux actions exercées sur *ab* par les trois autres côtés du rectangle, elles sont négligeables vis-à-vis de celle de AB, parce que les divers points de ces portions du fil sont à des distances beaucoup plus grandes de l'aiguille.

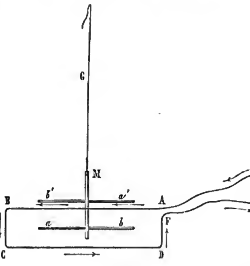


Fig. 164.

Donc l'addition de l'aiguille supérieure *ab*, outre qu'elle diminue considérablement l'action directrice de la terre, augmente encore l'action du courant.

Le *galvanomètre*, dont nous avons été conduit à indiquer ainsi successivement les principes essentiels, est dû à Nobili; c'est aujourd'hui, avec les perfectionnements successifs qu'on a apportés dans sa construction, un appareil d'une extrême sensibilité. Le fil de cuivre couvert de soie, qui doit agir sur le système des aiguilles, est enroulé sur un cadre d'ivoire AB (*fig.* 165) : ses deux extrémités vont aboutir à deux petites colonnes métalliques C, C', qui servent à fixer les fils dans lesquels se propage le courant que l'on se propose d'étudier. Les deux

aiguilles sont assujetties l'une à l'autre par un fil de cuivre rigide, et le système est suspendu à un fil de cocon L, supporté lui-même par les colonnes H, H'. On a placé au-dessous de l'aiguille supérieure un cercle de cuivre S, portant sur son contour une graduation qui permet de mesurer les angles d'écart de l'aiguille. — Une cloche de verre garantit l'instrument de l'influence de l'agitation de l'air.

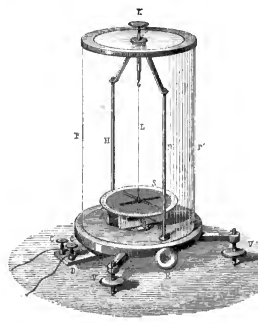


Fig. 165. — Galvanomètre.

249. **Usage du galvanomètre.** — Pour faire une expérience avec cet instrument, on laisse d'abord le système des aiguilles prendre une position d'équilibre stable dans le méridien magnétique ; puis, on fait tourner le cadre autour de l'axe vertical de l'appareil, de manière à le placer parallèlement aux aiguilles, c'est-à-dire dans le méridien magnétique ; ce mouvement se réalise ordinairement au moyen d'un engrenage qui correspond au bouton extérieur E. Le zéro de la graduation du cercle correspond alors à l'extrémité de l'aiguille.

L'instrument étant ainsi réglé, si l'on y fait passer un courant, le sens dans lequel l'aiguille est déviée indique immédiatement le sens de ce courant : en outre, la comparaison des angles d'écart produits par deux courants différents permet de prononcer lequel des deux est le plus intense.

On dit que deux courants ont des *intensités égales* lorsque, traversant un même galvanomètre, ils dévient du même angle le système des deux aiguilles.

Quant à la mesure des intensités des courants inégaux, elle repose sur des principes dans le détail desquels nous n'avons pas à entrer.

Il nous suffira de savoir que, pour les courants qui produisent des déviations ne dépassant pas 20 à 30 degrés, *on peut considérer les angles d'écart comme mesurant sensiblement les intensités relatives des courants eux-mêmes*. — Pour obtenir, avec le même instrument, une mesure des intensités de courants plus intenses, il est indispensable de construire expérimentalement, pour chaque galvanomètre, une table qui donne les intensités correspondantes aux divers angles d'écart.

250. **Résultats généraux, relatifs aux intensités des courants.** — L'expérience montre que l'intensité d'un courant ne dépend pas seulement de la source qui le produit, mais aussi des résistances offertes par les corps conducteurs que ce courant doit traverser pour aller d'un pôle à l'autre.

Avec une même source, *on diminue l'intensité d'un courant en augmentant la longueur, ou en diminuant la section des conducteurs interposés dans le circuit.*

Toutes choses égales d'ailleurs, la nature des conducteurs a, en outre, une influence spécifique, que l'on caractérise en disant que les divers corps ont des *résistances spécifiques* différentes : c'est ainsi qu'un fil de fer produit, dans un circuit, le même effet qu'un fil de cuivre de même diamètre et de longueur sept fois et demie plus grande.

Les liquides ont, par rapport aux métaux, une résistance spécifique extrêmement considérable : une colonne liquide, d'une longueur déterminée, équivaut, toutes choses égales d'ailleurs, à une longueur de métal plusieurs millions de fois plus grande. — On voit donc que l'interposition de couches liquides, même assez peu épaisses, dans un courant, introduit toujours une résistance tellement considérable, qu'on peut presque toujours négliger, vis-à-vis d'elle, les résistances offertes par les parties métalliques du circuit.

ACTIONS DES COURANTS SUR LES AIMANTS.

251. **Action directrice d'un courant sur un aimant.** — L'expérience d'Œrsted (244) prouve qu'un courant rectiligne exerce, sur un aimant mobile autour de son milieu, dans un plan parallèle au courant rectiligne, une action directrice qui tend à le mettre en croix avec le courant : nous rappellerons que, d'après la loi d'Ampère, le pôle austral de l'aimant tend à se mettre à la gauche du courant.

252. **Action directrice réciproque, exercée par un aimant sur un courant mobile** — L'un des moyens les plus simples pour obtenir des conducteurs parcourus par des courants, et qui puissent cependant obéir aux actions qui tendent à les déplacer, consiste dans l'emploi des piles flottantes, qui sont dues à M. de la Rive. — Sur un vase contenant de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, on fait flotter une lame de

zinc Z et une lame de cuivre C (*fig.* 166), assujetties dans une rondelle de liége : un fil métallique L, unissant les deux lames entre elles, sera parcouru par un courant allant du cuivre au zinc.

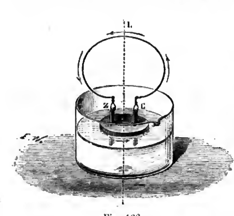


Fig. 166.

Or, si l'on place horizontalement un barreau aimanté au-dessus de la partie supérieure L de ce fil, et dans le même plan vertical que lui, on voit tout l'équipage tourner sur lui-même, et se mettre en croix avec l'aimant : c'est, comme on voit, l'expérience inverse de celle d'Œrsted. — Le sens de cette action est d'accord avec la loi d'Ampère, et l'observateur, en se plaçant comme l'indique cette loi, constate que le courant s'oriente de manière que le pôle austral soit à sa gauche.

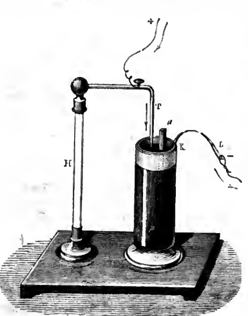


Fig. 167.

253. **Rotation d'un aimant sous l'action d'un courant.** — Parmi les expériences très-nombreuses qui constatent l'action des courants sur les aimants, nous choisirons encore la suivante, qui est due à M. Faraday. — Un barreau aimanté *a* (*fig.* 167) est placé verticalement dans une éprouvette pleine de mercure, et lesté par un petit cylindre de platine *p*, fixé à sa partie inférieure. On fait communiquer le centre de la surface du mercure avec l'un des pôles d'une pile, au moyen d'une pointe métallique T, et le contour de la

surface avec l'autre pôle, au moyen d'un anneau K fixé à l'intérieur de l'éprouvette. On voit l'aimant se rapprocher d'abord, en tournant autour de la tige, puis arriver au contact avec elle, et continuer à tourner tant que le courant passe. — Ici encore, on constate que le sens de la rotation est d'accord avec la loi d'Ampère; d'ailleurs, le mouvement se continue indéfiniment sous l'action du courant, parce que, pendant le déplacement du barreau, les courants qui se propagent à la surface du mercure conservent toujours la même position par rapport au barreau lui-même.

ACTIONS DES COURANTS SUR LES COURANTS.

254. **Actions de deux courants parallèles l'un sur l'autre.** — On a employé, pour étudier par l'expérience les actions qu'exercent l'un sur l'autre deux conducteurs parcourus par un courant, un grand nombre d'appareils de formes diverses : l'un des plus simples est le suivant. Un fil métallique *adefgb* (*fig.* 168), replié comme l'indique la figure, est terminé à ses deux extrémités *a* et *b* par deux

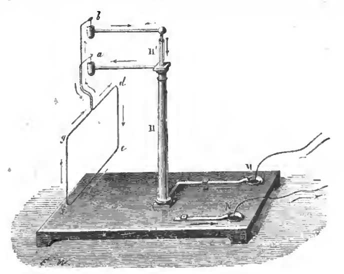


Fig. 168.

pointes d'acier verticales, qu'on plonge dans des godets pleins de mercure Ces godets communiquent, l'un *a* avec une colonne métallique creuse H, dans laquelle on peut amener un courant au moyen d'un fil partant de l'un des pôles d'une pile et plongeant dans le godet M; l'autre *b*, avec une tige métallique H', située à l'intérieur de H, isolée dans un tube de verre, et par laquelle le courant, après avoir parcouru l'équi-

page mobile, revient au godet N et à la pile. Au moyen de cette disposition, on obtient, comme on voit, un conducteur de forme rectangulaire qui peut, sans cesser d'être parcouru par le courant, tourner autour d'un axe vertical passant par *a* et *b*.

Pour avoir une autre portion de courant, dont nous puissions étudier l'action sur les diverses parties du premier, nous emploierons un cadre de bois rectangulaire MNPQ (*fig.* 169), sur lequel nous aurons enroulé un fil métallique couvert de soie : pour interposer ce fil dans le courant, il suffira de mettre ses extrémités R, S, en communication avec les fils conducteurs de la pile.

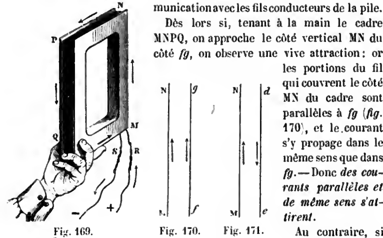


Fig. 169. Fig. 170. Fig. 171.

Dès lors si, tenant à la main le cadre MNPQ, on approche le côté vertical MN du côté *fg*, on observe une vive attraction : or les portions du fil qui couvrent le côté MN du cadre sont parallèles à *fg* (*fig.* 170), et le courant s'y propage dans le même sens que dans *fg*. — Donc ***des courants parallèles et de même sens s'attirent.***

Au contraire, si l'on approche ce même côté MN du côté *de* de l'équipage mobile, il se produit une répulsion très-vive ; or les portions du fil qui sont appliquées sur MN sont encore parallèles à *de* (*fig.* 171), mais elles sont parcourues par le courant en sens contraire. — Donc ***deux courants parallèles et de sens contraire se repoussent.***

255. **Action de deux courants croisés l'un sur l'autre.** — Reprenons le cadre MNPQ (*fig.* 169), et plaçons le côté PN au-dessous de *fe* (*fig.* 168), de manière qu'il fasse avec lui un certain angle. Les courants se propageant dans le sens indiqué par les flèches de la figure 172, on voit le côté mobile *ef* tourner sur lui-même, et ses deux moitiés O*e*, O*f* se porter respectivement vers ON et OP. Donc il y a attraction entre les deux côtés qui forment l'angle *e*ON, et dans lesquels les deux courants s'approchent du sommet de l'angle ; il y a aussi attraction entre les côtés qui forment l'angle PO*f*, et dans lesquels les deux courants s'éloignent du sommet de l'angle. — Donc, *deux courants croisés*

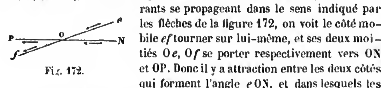


Fig. 172.

s'attirent, quand ils s'approchent ou s'éloignent ensemble de leur point de croisement.

Au contraire, si l'on intervertit le sens du courant dans l'un des conducteurs, par exemple dans les fils qui ont la direction NP, de telle sorte que le courant prenne la direction PN (*fig.* 173), on voit les deux moitiés O*e* et O*f* s'éloigner respectivement de ON et OP, pour se porter vers OP et ON. — Donc il y a répulsion entre les deux côtés de l'angle *e*ON, dans lesquels l'un des courants s'approche du sommet de l'angle tandis que l'autre s'en éloigne : il en est de même pour les côtés de l'angle PO*f*. — Donc, *deux courants croisés se repoussent, quand l'un s'approche du point de croisement tandis que l'autre s'en éloigne.*

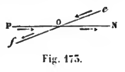


Fig. 173.

256. **Deux portions consécutives d'un même courant rectiligne se repoussent.** — Deux rigoles parallèles M, N (*fig.* 174), séparées par une cloison isolante, contiennent du mercure : à la surface du liquide sont placées les deux branches d'un fil métallique couvert de soie, dont les extrémités seules sont mises à nu et plongent dans le mercure. Le courant arrive en X, traverse le mercure et le conducteur, et sort en Y. — Or, dès que les communications sont établies, on voit le conducteur se mettre en mouvement de gauche à droite. On en conclut qu'il y a eu répulsion entre les portions de courant qui ont traversé successivement le mercure et le fil de cuivre.

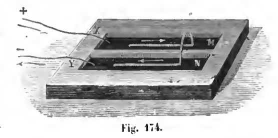


Fig. 174.

257. **Action d'un courant sinueux, comparée à celle d'un courant rectiligne ayant les mêmes extrémités.** — L'expérience montre, comme nous allons l'indiquer, qu'*un courant sinueux a la même action qu'un courant rectiligne de même intensité et terminé aux mêmes extrémités*, pourvu que la distance à laquelle s'exerce cette action soit très-grande par rapport à l'amplitude des sinuosités. — Pour le vérifier, on prend un fil de cuivre *ihl* (*fig.* 175), dont l'une des bran-

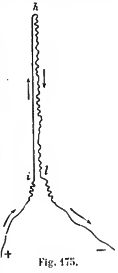


Fig. 175.

ches *ih* est rectiligne, l'autre *hl* sinueuse, et dont les extrémités communiquent avec les pôles de la pile : si le principe précédent est exact, l'action du système de ces deux fils sur un conducteur quelconque doit être nulle, puisque l'action de *hl* doit être équivalente à celle d'un courant rectiligne, de même longueur et de même intensité que *ih*, mais de sens contraire. On constate en effet, en approchant le système *ihl* de l'un quelconque des côtés du courant mobile de la figure 168, qu'il ne produit aucun mouvement sur ce courant.

ACTION DE LA TERRE SUR LES COURANTS.

258. **Action de la terre sur un courant fermé, mobile autour d'un axe vertical.** — Lorsqu'on abandonne, sous l'action de la terre seule, un courant fermé mobile autour d'un axe vertical, comme le courant rectangulaire de la figure 176, on le voit tourner sur lui-

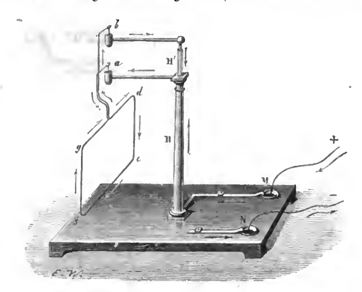


Fig. 176.

même, et se placer *perpendiculairement au méridien magnétique*, de telle manière que, dans la partie horizontale inférieure, le courant soit dirigé *de l'est à l'ouest.*

Ce résultat s'explique immédiatement si l'on assimile l'action de la terre à celle d'un aimant, comme nous l'avons fait dans la théorie du magnétisme terrestre. En effet, les deux portions rectilignes et horizontales *ef*, *gd* étant parcourues par des courants de sens contraire, et leur

distance aux pôles de l'aimant terrestre étant d'ailleurs sensiblement la même, les actions de la terre sur ces deux parties doivent être considérées comme se faisant équilibre. Si, au contraire, on a égard aux actions de l'aimant terrestre sur les courants verticaux *de*, *fg*, dont l'un est descendant et l'autre ascendant, il est facile de voir que, d'après la loi même d'Ampère, le premier *de* doit tendre à se porter vers l'est, le second *gh* doit se porter vers l'ouest. C'est donc bien quand le courant *ef* est dirigé de l'est à l'ouest qu'il doit y avoir équilibre.

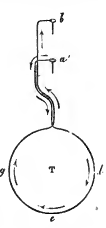


Fig. 177.

Remarque. — On obtient un résultat semblable lorsqu'on emploie, au lieu du rectangle *defg*, le conducteur circulaire *deg* (*fig.* 177). L'équilibre est encore établi lorsque le courant est dirigé de l'est à l'ouest dans la partie inférieure *e* du cercle.

259. **L'action de la terre est assimilable à celle d'un courant indéfini, perpendiculaire au méridien magnétique et dirigé de l'est à l'ouest.** — Nous démontrerons ce principe dans le cas particulier où l'on considère l'action de la terre sur un courant rectangulaire, mobile autour d'un axe vertical, comme celui de la figure 176.

Cherchons d'abord quelle serait l'action exercée, sur un pareil courant, par un courant horizontal indéfini XY (*fig.* 178), placé au-dessous de lui de façon qu'il soit rencontré en L par l'axe de rotation. — D'après le principe des courants croisés, et en supposant aux courants la direction qu'indiquent les flèches, il y a attraction entre le courant *de* et la partie de XY qui est à sa gauche : il y a, au contraire, répulsion entre *de* et la partie de XY qui est à sa droite : donc, puisque *de* peut se mouvoir parallèlement à lui-même en tournant autour de l'axe vertical *a* L, il doit tendre à se placer dans le plan vertical *a* LX, et à

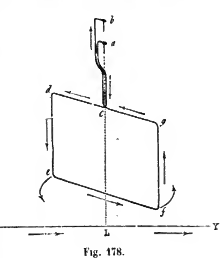


Fig. 178.

gauche de *a*L. On verra, tout à fait de la même manière, que *fg* doit tendre à se placer dans le même plan, et à droite de *a*L. — Nous négligerons ici les actions exercées par XY sur les portions horizontales *ef*, *dg* : on voit en effet que, si XY est assez voisin du rectangle, la première de ces actions concorde avec les précédentes, et l'emporte sur la seconde, qui serait contraire ; mais, dans le cas où XY est très-éloigné (et c'est ce que nous supposerons en assimilant l'action de la terre à celle d'un courant), les actions exercées sur les portions horizontales se font sensiblement équilibre. — Quoi qu'il en soit, on voit, comme résultat définitif, que, sous l'action du courant XY, il y aura équilibre stable lorsque le courant qui parcourt *la partie horizontale inférieure sera parallèle au courant indéfini et de même sens que lui.* — C'est d'ailleurs ce que vérifie immédiatement l'expérience.

Or, nous avons dit déjà que le courant rectangulaire *defg* de la figure 176, abandonné à lui-même sous la seule action de la terre, se place perpendiculairement au méridien magnétique et de façon que le courant aille, en *ef*, de l'est à l'ouest : l'effet produit par l'action de la terre est donc bien celui auquel on est conduit, en assimilant cette action à celle d'un courant perpendiculaire au méridien magnétique et dirigé de l'est à l'ouest.

260. **Conducteurs astatiques.** — Lorsqu'on veut soumettre des

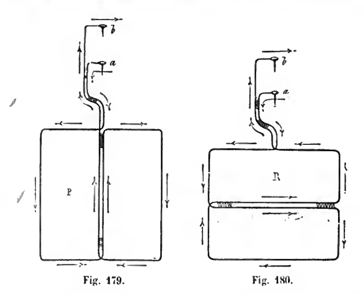


Fig. 179. Fig. 180.

courants mobiles à l'action d'aimants assez faibles, ou de courants peu intenses, il est souvent utile de les soustraire à l'action de la terre, qui

pourrait contrarier les effets qu'on se propose d'obtenir. Les conducteurs représentés par les figures 179 et 180 satisfont à cette condition, c'est-à-dire qu'ils sont *astatiques*. — En effet, dans le premier (*fig.* 179), les deux fils verticaux les plus éloignés de l'axe de rotation, étant parcourus par des courants de même sens, tendraient à se porter tous deux du même côté du méridien magnétique : les actions de la terre sur ces deux fils se font donc équilibre. Il en est de même des actions sur les autres fils verticaux. Enfin, il en est de même encore des actions exercées sur les deux moitiés de chacune des portions horizontales : les courants étant dirigés en sens contraire dans ces deux moitiés, les actions exercées sur elles par la terre se neutralisent. — On verra, par des considérations semblables, que le second conducteur (*fig.* 180) est astatique, en comparant d'une part les deux courants horizontaux extrêmes aux deux courants horizontaux intermédiaires, et, d'autre part, les deux moitiés de chacun des fils verticaux.

SOLÉNOÏDES.

261. **Construction d'un solénoïde.** — Pour construire un *solénoïde*, on prend un fil de cuivre couvert de soie et on le contourne sur lui-même, comme l'indique la figure 181. Le solénoïde représenté par cette figure est disposé pour être suspendu aux petites coupes *a* et *b* de la figure 176, à la place de l'équipage rectangulaire. — Un courant pénétrant par *a* et sortant par *b* parcourt alors dans le même sens toutes les parties circulaires du fil : quant aux parties qui sont dirigées suivant l'arête supérieure du cylindre, elles forment, par leur ensemble, deux courants rectilignes de même longueur et de sens contraires, dont les actions se neutralisent. — Donc, en définitive, un pareil système doit être considéré comme formé essentiellement de courants circulaires, égaux, de même sens, et dont tous les centres sont sur une ligne droite à laquelle les plans des cercles eux-mêmes sont perpendiculaires.

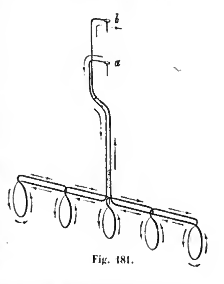


Fig. 181.

262. **Action de la terre sur un solénoïde.** — Le solénoïde

précédent étant suspendu à l'appareil de la figure 176, l'expérience montre que son axe se place dans le méridien magnétique, comme le ferait une aiguille aimantée mobile dans un plan horizontal. — Ce résultat pouvait être prévu, car chacun des cercles qui composent le solénoïde tend à se placer sous l'action de la terre perpendiculairement au méridien magnétique (258, *Remarque*); donc, l'axe du solénoïde, qui est perpendiculaire au plan des cercles, doit se placer dans le méridien magnétique lui-même.

Quand le solénoïde a pris sa position d'équilibre et qu'on l'en écarte, il y revient après quelques oscillations, comme une aiguille aimantée, et c'est toujours la même extrémité qui se tourne vers le nord. — Un solénoïde a donc un pôle *austral* et un pôle *boréal*, comme un aimant. Ces pôles peuvent être déterminés par l'expérience actuelle : on en peut également prévoir *a priori* la position, en remarquant que le solénoïde doit se placer de telle façon que, dans la partie inférieure des circonférences qui le forment, le courant aille de l'est à l'ouest.

263. **Action d'un courant rectiligne sur un solénoïde.** — Si l'on soumet le même solénoïde à l'action d'un courant rectiligne, en plaçant, par exemple, au-dessous de lui l'un des fils conducteurs du courant, on constate qu'il tend à se mettre en croix avec le courant, son pôle austral se portant à gauche. Il se comporte donc, dans ce cas encore, comme un aimant. — C'est ce qu'on peut encore s'expliquer, au moyen des actions des courants les uns sur les autres, en remarquant que chacun des cercles tend à se placer parallèlement au courant; toutes ces actions concourent donc à placer l'axe du solénoïde en croix avec le courant fixe.

On devra remarquer d'ailleurs que, dans cette expérience, le solénoïde étant soumis en même temps à l'action de la terre, qui tend à ramener son axe dans le méridien magnétique, il prend réellement une direction intermédiaire entre le méridien magnétique et la direction perpendiculaire au courant fixe.

264. **Action mutuelle de deux solénoïdes.** — Soit un premier solénoïde, comme celui de la figure 181, suspendu à l'appareil de la figure 176, et un second solénoïde, communiquant également avec les pôles de la pile, et qu'on tiendra à la main. — Si l'on présente le pôle austral de l'un au pôle austral de l'autre, on constate une répulsion. Il en est de même si l'on met le pôle boréal en présence du pôle boréal. — Au contraire, si l'on présente le pôle austral au pôle boréal, il y a attraction. — Donc, pour les solénoïdes comme pour les aimants, ***deux pôles de même nom se repoussent; deux pôles de noms contraires s'attirent.***

Ce résultat peut encore s'expliquer au moyen des actions des courants les uns sur les autres : en effet, quand les deux pôles de même nom sont en regard, leurs éléments correspondants sont sensiblement paral-

lèles, et les courants qui les traversent sont de sens contraire; il doit donc y avoir répulsion. — Au contraire, quand ce sont des pôles de noms contraires qu'on met en regard, leurs éléments correspondants sont encore parallèles, mais les courants qui les traversent sont de même sens. il doit donc y avoir attraction.

265. **Action d'un aimant sur un solénoïde.** — En employant une méthode tout à fait analogue, on constate que le pôle austral d'un aimant repousse le pôle austral d'un solénoïde; que le pôle boréal repousse le pôle boréal. — Au contraire, le pôle austral de l'un attire le pôle boréal de l'autre, et réciproquement.

Ces résultats de l'expérience peuvent encore être facilement interprétés, en se reportant à la direction du courant dans les cercles qui forment le solénoïde (262), et en appliquant la loi d'Ampère (245).

266. **Assimilation des aimants aux solénoïdes.** — Nous venons de voir les solénoïdes se comporter, soit sous l'action de la terre, soit sous l'action d'un courant rectiligne, soit sous l'action d'autres solénoïdes, soit enfin sous l'action des aimants, absolument comme se comportent les aimants eux-mêmes : cette analogie, qui se poursuit jusque dans les détails, a conduit Ampère à une théorie qui tend à considérer les aimants comme n'étant autre chose que des systèmes de courants circulaires, constituant de véritables solénoïdes.

D'après la théorie d'Ampère, en effet, les aimants devraient leurs propriétés à des courants électriques, circulant autour de leurs particules. Ces courants, qui existeraient déjà dans les substances magnétiques non aimantées, dans le fer doux, par exemple, auraient alors, dans les diverses particules, des orientations diverses et absolument quelconques : de là une neutralisation complète des effets qu'ils peuvent exercer. — Le phénomène de l'aimantation consisterait dans une orientation de tous ces courants particulaires, orientation telle qu'ils fussent amenés à circuler dans des plans parallèles et dans le même sens : cette orientation, passagère dans le fer doux aimanté par influence, serait durable dans l'acier trempé, qui est doué de force coercitive. Un barreau aimanté ne serait donc autre chose qu'un ensemble de files de molécules, dont chacune représenterait un petit solénoïde.

Cette théorie, qui établit une liaison intime entre le magnétisme et l'électricité, permet d'expliquer très-simplement un grand nombre des résultats des expériences de l'électro-magnétisme. — Elle acquiert un intérêt nouveau par les phénomènes de l'aimantation par les courants, qui vont maintenant nous occuper.

CHAPITRE V.

Aimantation par les courants. — Télégraphes électriques.
Induction. — Expériences fondamentales. — Appareil de Pixii ou de Clarke

AIMANTATION PAR LES COURANTS.

267. **Développement du magnétisme par les courants.** — En plaçant une aiguille de fer doux en croix avec un fil métallique traversé par un courant, Arago constata que cette aiguille s'aimante, son pôle austral se développant à la gauche du courant : l'aimantation cesse dès que le courant est interrompu.

Dans les mêmes circonstances, une aiguille d'acier trempé s'aimante également, bien qu'avec plus de lenteur; mais l'aimantation persiste après qu'on a interrompu le courant.

Donc, soit qu'on regarde l'aimantation comme produite par la séparation des deux fluides répandus dans les éléments magnétiques (212), soit qu'on l'attribue à l'orientation des courants particulaires (266), il faut admettre qu'un courant, placé dans le voisinage d'un corps magnétique non aimanté, exerce sur les fluides ou sur les courants une action qui convertit ce corps en un aimant véritable. — L'acier trempé diffère du fer doux en ce que sa force coercitive rend permanente la séparation des fluides, ou l'orientation des courants particulaires.

268. **Procédé d'aimantation de l'acier par les courants.** — Le résultat de l'expérience d'Arago une fois constaté, Ampère eut l'idée d'accroître l'action exercée par un courant sur une aiguille d'acier, en enroulant plusieurs fois autour de l'aiguille le conducteur qui est traversé par le courant.

Pour aimanter fortement une aiguille d'acier, il suffit de la placer dans un tube de verre (*fig.* 182), autour duquel on aura enroulé en hélice

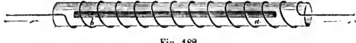


Fig. 182.

un fil métallique couvert de soie : si l'on fait passer dans ce fil, pendant quelques instants seulement, un courant un peu intense, on constate que l'aiguille est fortement aimantée. — Le sens de l'aimantation dépend à la fois du sens dans lequel l'hélice a été enroulée et du sens dans lequel on y fait passer le courant; dans tous les cas, la loi d'Ampère suffit pour prévoir de quel côté doit se former le pôle austral *a*.

Si, au lieu d'enrouler le fil toujours dans le même sens, on fait avec

lui une série d'hélices, les unes *dextrorsum*, les autres *sinistrorsum*, on

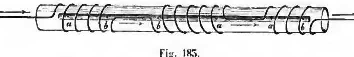


Fig. 183.

obtient des *points conséquents*, c'est-à-dire des pôles autres que ceux des extrémités, et distribués comme l'indique la figure 183.

269. **Électro-aimants.** — On conçoit, d'après ce qui précède, qu'un barreau de fer doux, environné d'un fil conducteur enroulé en spirale, doit devenir un aimant véritable, au moment où le fil est parcouru par un courant, et qu'il doit retomber à l'état neutre dès que le courant est interrompu. Tel est le principe de la construction des *électro-aimants*, auxquels on peut donner une puissance bien supérieure à celle des aimants proprement dits, même les plus énergiques.

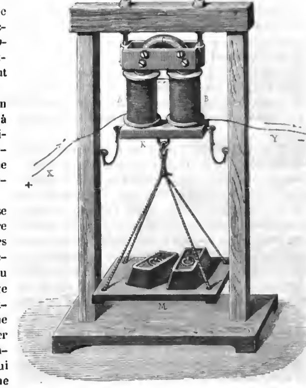


Fig. 184. — Électro-aimant.

Lorsqu'on se propose de faire supporter des poids à un électro-aimant, ou de faire usage de sa force attractive sur une pièce de fer doux, il y a avantage à lui donner, comme aux aimants véritables, la forme d'un fer à cheval. Les deux branches sont alors placées dans l'axe de bobines A, B (*fig.* 184), sur lesquelles s'enroule un même fil de cuivre

couvert de soie. Le sens de l'enroulement doit être tel que les actions des deux bobines concordent pour développer l'aimantation : ce résultat est obtenu si l'enroulement est tel que, en supposant la barre redressée et les deux bobines superposées par leurs bases voisines, l'hélice de l'une soit la continuation de l'hélice de l'autre. — Les deux pôles de l'électro-aimant agissant à la fois sur le contact K, pour l'aimanter par influence, on verra, comme pour les aimants en fer à cheval (217), que ce contact doit pouvoir soutenir un poids bien supérieur au double de celui que porterait un seul pôle.

TÉLÉGRAPHES ÉLECTRIQUES.

270. **Télégraphie électrique.** — Les systèmes de télégraphie électrique qui sont aujourd'hui le plus généralement employés reposent sur la propriété que possèdent les électro-aimants d'exercer une attraction sur une pièce de fer doux placée en face de leurs pôles, dès que le fil qui les environne est traversé par un courant, et de redevenir inactifs dès que ce courant est interrompu.

Un appareil télégraphique se compose essentiellement :

1° D'une *pile*, placée en général au point d'où doit partir la dépêche.

2° D'une *ligne télégraphique*, c'est-à-dire d'un système de conducteurs, établissant la communication entre les points qui sont en correspondance.

3° D'un appareil, placé au point de départ de la dépêche, qui permet d'interrompre ou de rétablir à volonté le courant, suivant des règles conventionnelles, et assez rapidement pour produire un grand nombre de signaux dans un temps très-court. Cet appareil est le *manipulateur*.

4° D'un appareil, placé au point d'arrivée, et comprenant un ou plusieurs électro-aimants, dans lesquels le courant développera le magnétisme, chaque fois qu'il leur sera transmis : des pièces de fer doux, placées en face de ces électro-aimants, seront alors attirées, pour être ensuite abandonnées quand le courant cessera d'arriver. Le mouvement de ces pièces, se transmettant ensuite à des organes de diverses formes, produira tels ou tels effets, selon qu'il s'agira de tel ou tel système. Ce dernier appareil est le *récepteur*.

Nous n'avons pas à revenir sur la description des piles. On emploie presque exclusivement en France la pile de Daniell, qui donne un courant d'une intensité bien constante, pourvu qu'on nettoie les éléments à peu près tous les mois.

Nous dirons quelques mots de l'établissement de la ligne, et nous décrirons rapidement le manipulateur et le récepteur de deux des systèmes les plus employés, le *télégraphe de Morse* et le *télégraphe à cadran*.

271. **Établissement de la ligne. — Suppression du fil de**

retour. — Les fils qui établissent la communication entre les postes télégraphiques doivent être isolés avec soin. — Lorsqu'ils sont à l'air libre, on les soutient au moyen de petits crochets fixés à des supports de porcelaine, lesquels sont appliqués eux-mêmes sur des poteaux de bois. Lorsqu'on les fait passer sous terre, on les noie dans une masse de bitume. Quant aux fils sous-marins, on les enveloppe de gutta-percha.

Dans les premiers temps de l'emploi des télégraphes, on employait toujours un premier fil, allant du pôle positif de la pile au récepteur du poste d'arrivée, puis un second fil ou *fil de retour*, revenant du récepteur au pôle négatif de la pile. — On supprime aujourd'hui ce second fil : on fait simplement communiquer le récepteur avec la terre et l'on met de même en communication avec la terre le pôle négatif de la pile. La terre joue, dans ce cas, le rôle d'un corps conducteur de surface infinie, dans lequel l'électricité s'écoule successivement, en sorte qu'il se produit un véritable courant, allant du pôle positif au récepteur, par l'affluence incessante d'une nouvelle quantité de fluide.

On n'a pas seulement l'avantage d'économiser ainsi la moitié de la longueur de fil qui serait nécessaire, si l'on avait employé un fil de retour; on obtient encore, avec une même pile, un courant d'une intensité presque double.

272. **Système de Morse.** — Manipulateur. — Le manipulateur du télégraphe de Morse se compose d'un levier métallique K (*fig.* 185), mobile autour de l'axe S; cet axe communique avec la ligne, comme l'indique la figure. On manœuvre le levier en appuyant avec la main sur la poignée de bois P : la pointe métallique *t* vient alors toucher la borne métallique *b* qui communique avec le pôle positif de la pile, en sorte que, tant que dure la pression exercée sur la poignée, le courant de la pile passe sur la ligne. Dès que cette pression cesse, un ressort *r* relève le levier, et le courant est interrompu; la vis V, en venant butter contre la borne *a*, limite la course du levier dans ce sens. — Il suffit de faire varier la durée des contacts de la pointe *t* avec la borne *b*, ainsi que la durée des interruptions, pour envoyer sur la ligne des courants discontinus, de durée variable, et séparés par des intervalles variables.

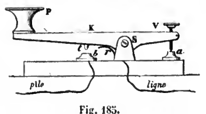


Fig. 185.
Manipulateur du télégraphe de Morse.

273. Récepteur. — La pièce essentielle du récepteur est un levier D (*fig.* 186), mobile autour d'un axe O, et dont les mouvements reproduisent ceux du levier du manipulateur. La branche OA porte un cylindre de fer creux horizontal A, perpendiculaire au plan de la figure ci-contre, et

placé au-dessus d'un électro-aimant E dont le fil communique, d'une part avec la ligne, d'autre part avec la terre. L'autre extrémité du levier porte une pointe V, qui y est implantée obliquement; au-dessus, passe une bande de papier XY, qui est entraînée entre les deux cylindres horizontaux *b*, *a*, mus par un mouvement d'horlogerie; cette bande de papier se déroule en abandonnant successivement le tambour R, placé au-dessus de l'appareil. Sur la surface du cylindre *b* est pratiquée une rainure correspondante aux points que viendra toucher la pointe V, en se rapprochant de lui pendant sa rotation.

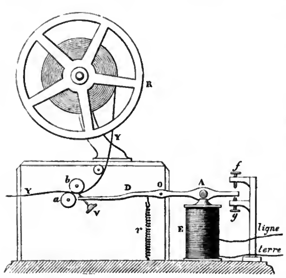


Fig. 186. — Récepteur du télégraphe de Morse.

Dès que le courant passe dans le fil, le cylindre de fer doux A est entraîné vers l'électro-aimant E, le bras de levier OV est relevé, et la pointe V, refoulant le papier dans la rainure du cylindre *b*, produit un trait gaufré : il en est ainsi tant que dure le courant envoyé sur la ligne, de sorte que la longueur du trait qui se produit dépend de la durée du courant lui-même. Dès que le courant est interrompu, le ressort *r* entraine en bas le bras de levier OV, et la pointe V reste éloignée du papier. — Afin d'éviter que ces oscillations du levier aient une trop grande amplitude, on place, au-dessus et au-dessous de l'extrémité droite du levier, deux vis *f* et *g*. L'une, *f*, est réglée de manière que la pièce A s'éloigne peu de l'électro-aimant pendant les interruptions du courant, et qu'elle obéisse ainsi plus vite à son attraction quand le courant sera rétabli; l'autre, *g*, empêche A de venir toucher l'électro-aimant, ce qui aurait l'inconvénient de développer dans le fer doux une aimantation persistante, au moins pendant quelque temps, et de troubler ainsi la marche de l'appareil.

Les signaux du système de Morse sont tous produits au moyen de deux traces différentes, pratiquées sur la bande de papier : le point (-), qui

correspond à un courant presque instantané, et le trait (——), auquel on donne toujours la même longueur et qui correspond à un courant d'une durée déterminée, que l'habitude indique. En combinant de diverses façons ces deux traces, on arrive à représenter. par un petit nombre de chacune d'elles, chaque lettre de l'alphabet, chaque signe de ponctuation, chaque chiffre, etc. — Les lettres sont séparées les unes des autres par un intervalle blanc, un peu plus grand que celui qui sépare les traces appartenant à une même lettre; enfin, les mots sont séparés les uns des autres par un espace blanc plus grand encore.

274. Modifications apportées à ce récepteur par MM. Digney frères. — Le gaufrage pratiqué dans la bande de papier par la pointe V, dans le récepteur de Morse, a l'inconvénient d'exiger que l'électro-aimant ait une grande puissance, et par suite, que le courant ait une grande intensité. Dans la modification apportée par les frères Digney, le gaufrage est remplacé par des traits à l'encre. La bande de papier, avant d'arriver entre les cylindres *b* et *a*, qui l'entraînent, passe au-dessous d'une petite roue dont la circonférence est couverte d'encre d'imprimerie; quand le levier D est au repos, le papier glisse au-dessous de cette roue sans la toucher, et il frotte sur une sorte de petit marteau qui remplace la vis V. Au moment où le courant passe, le petit marteau se relève, applique la bande de papier sur la roue couverte d'encre, et celle-ci y imprime une trace, dont la longueur dépend toujours de la durée du courant transmis à l'appareil par la ligne.

275. Télégraphe à cadran. — Manipulateur. — Le manipulateur du télégraphe à cadran, plusieurs fois modifié par M. Breguet, se compose aujourd'hui des pièces suivantes. Un disque de cuivre horizontal E (*fig.* 187), auquel on peut imprimer un mouvement de rotation autour de son centre, à l'aide de la manivelle M, porte sur sa face inférieure une rainure sinueuse, qui est indiquée sur la figure ci-contre par des traits ponctués; cette rainure offre treize sinuosités saillantes et treize sinuosités rentrantes, en tout vingt-six alternatives. Dans la rainure s'engage, en *a*, une petite goupille métallique, fixée à l'extrémité du levier OG, qui est mobile autour du point O; l'autre extrémité de ce levier est terminée par une lame métallique flexible, située dans l'intervalle de deux vis métalliques *p*, *p'*. Lorsqu'on imprime au disque un mouvement de rotation, la goupille *a* suit les sinuosités de la rainure, qui l'éloignent et la rapprochent successivement du centre du disque; par suite, la lame flexible qui est à l'autre extré-

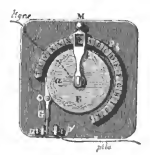


Fig. 187.
Manipulateur du télégraphe à cadran.

mité du levier vient toucher alternativement les deux vis p et p'. Donc, si la vis p' communique avec le pôle positif de la pile, et le centre du disque avec la ligne, comme l'indique la ligne ponctuée marquée sur la figure, toutes les fois que a arrivera dans une sinuosité saillante, la lame viendra toucher p', et le courant passera dans le disque et sur la ligne; toutes les fois que a arrivera dans une sinuosité rentrante, la lame viendra toucher p, et le courant sera interrompu. — L'extrémité de la manivelle M est placée au-dessus d'un cadran circulaire, portant vingt-six compartiments dans lesquels sont indiquées les vingt-six lettres de l'alphabet et une *croix* conventionnelle. Dans les appareils qui sont en usage dans les postes télégraphiques, ce cadran est une plaque métallique pleine, qui cache au-dessous d'elle le disque E. Dans la figure ci-contre, on a réduit cette plaque à son contour, pour montrer le disque E, et on en a encore enlevé une portion sur la gauche, pour rendre bien visible le levier G. Au milieu de chacune des cases est une petite encoche, pratiquée dans le métal, et dans laquelle peut s'arrêter une petite goupille fixée au-dessous de la manivelle; une fenêtre, pratiquée dans la manivelle, permet d'apercevoir la lettre ou le signe que porte la case correspondante (dans la figure ci-contre, la manivelle est placée sur la *croix*).

Pour concevoir le mécanisme de l'envoi d'une dépêche, on devra supposer la manivelle placée d'abord sur la croix : le levier G est en contact avec p, et le courant est interrompu; si l'on transporte alors la manivelle sur une lettre de rang quelconque, le nombre total des établissements et des interruptions du courant sera précisément égal au rang même de cette lettre. L'opérateur s'arrête un moment sur la lettre qu'il veut indiquer, et passe ensuite aux lettres suivantes, en faisant mouvoir toujours la manivelle dans le même sens. — Un instant d'arrêt sur la croix sert à indiquer qu'on passe d'un mot à un autre.

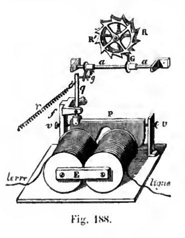


Fig. 188.

276. Récepteur. — La partie essentielle du récepteur est un système de deux roues dentées R, R' (*fig.* 188), montées sur un même axe, et qui doivent reproduire tous les mouvements du disque E du manipulateur. Chacune de ces roues porte treize dents, et les dents de l'une *alternent avec celles de l'autre*, en sorte que l'intervalle de deux dents consécutives de ce système, qui constitue l'*échappement*, est d'un vingt-sixième de circonférence. L'axe commun des deux roues de l'échappement est sollicité à se mouvoir d'une manière continue par un mouve-

ment d'horlogerie; mais un arrêt G, qui, par des mouvements en avant et en arrière autour de l'axe *aa*, peut venir butter alternativement contre une dent de la roue antérieure et contre une dent de la roue postérieure, ne laisse avancer l'échappement que par intermittences. Ces intermittences sont réglées comme il suit, par les courants qui arrivent de la ligne. — L'axe *aa* qui porte l'arrêt est muni, à l'une de ses extrémités, d'une fourchette F, à cheval sur une goupille *g*, qui est fixée à la tige *q*; cette tige est portée par une palette de fer doux P, mobile autour d'un axe passant par les pointes des vis *v*, *v*, et placée en présence des pôles d'un électro-aimant E. Le fil de l'électro-aimant communique, d'une part, avec la ligne, d'autre part, avec la terre. Or supposons, comme nous l'avons fait pour l'envoi de la dépêche, que la manivelle du manipulateur ait été d'abord placée sur la croix; le courant n'arrive pas à l'électro-aimant, et la palette, maintenue verticale par le ressort *r*, met en prise l'arrêt G avec une dent de la roue postérieure de l'échappement : une aiguille fixée à l'axe de l'échappement lui-même, et mobile sur le cadran placé à l'extérieur de la boîte du récepteur (*fig.* 189), est alors arrêtée sur la croix de ce cadran. Si la

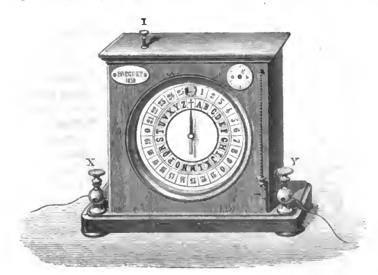


Fig. 189. — Récepteur du télégraphe à cadran.

manivelle du manipulateur est portée sur la lettre A de son cadran, le courant arrive à l'électro-aimant du récepteur, la palette P est attirée, la tige *q* est portée en arrière, et, par suite, l'arrêt G vient en avant, abandonnant la dent de la roue postérieure pour venir arrêter au passage la dent suivante de la roue antérieure : l'axe des roues a fait un vingt-sixième de tour, et l'aiguille extérieure est arrivée sur la lettre A. — De

même, si la manivelle du manipulateur est portée sur la lettre B, le courant est interrompu dans le fil de l'électro-aimant, la palette P est ramenée à sa position primitive par le ressort *r*, et l'arrêt G, se portant en arrière, vient heurter la dent suivante de la roue postérieure : l'échappement a donc fait encore un vingt-sixième de tour. — Il en est de même pour chacun des mouvements du manipulateur, en sorte que tous les mouvements effectués par la manivelle, au poste de départ, sont reproduits par l'aiguille au poste d'arrivée.

INDUCTION.

277. **Induction.** — On donne le nom d'*induction* à la production de courants presque instantanés, dans des circuits conducteurs fermés, sous l'influence d'autres courants ou sous l'influence des aimants.

Ces courants possèdent toutes les propriétés des courants ordinaires; mais ils ont en général une durée très-courte et une très-grande intensité.

278. **Courants d'induction, produits sous l'influence des courants ordinaires.** — Pour démontrer la production de courants induits sous l'influence de courants ordinaires, nous prendrons deux bobines A, B (*fig.* 190), formées chacune d'un fil de cuivre, qui est recouvert de soie et enroulé sur un cylindre de bois creux : ces deux bobines ont des dimensions telles que l'une d'elles puisse être introduite dans la cavité de l'autre, et, sur chacune d'elles, le fil métallique est enroulé dans le même sens. Les extrémités du fil de la bobine B se terminent à des boutons métalliques qu'on voit à la partie

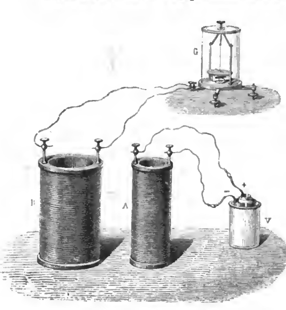


Fig. 190.

supérieure, et auxquels on peut fixer, au moyen de vis de pression, des fils métalliques se rendant à un galvanomètre G; les extrémités du fil de la bobine A sont mises en communication avec les pôles d'un élément de pile V.

Supposons le courant de la pile interrompu, et la bobine A placée dans la cavité de la bobine B. Après avoir réglé le galvanomètre, établissons brusquement la communication des pôles de la pile avec la bobine A : immédiatement l'aiguille sera chassée de sa position d'équilibre, mais elle y reviendra au bout de peu de temps, après avoir exécuté un certain nombre d'oscillations de part et d'autre de sa position d'équilibre. — Si maintenant, après avoir laissé l'aiguille revenir au zéro, on interrompt le courant de la pile qui passe dans la bobine A, on observe une nouvelle déviation de l'aiguille, en sens opposé de la première.

On donne le nom de *courant inducteur* au courant qui circule dans la bobine A, et dont l'établissement ou la rupture a produit un courant dans le circuit voisin B : ce dernier reçoit le nom de *courant induit*. — Si maintenant on a égard au sens dans lequel a eu lieu la déviation de l'aiguille dans ces deux circonstances, on constate qu'il indique, dans le premier cas, un courant de sens contraire à celui de la pile; dans le second cas, un courant de même sens. On arrive donc à formuler les deux lois suivantes :

Au moment où un courant voltaïque *commence*, il développe, dans un circuit fermé voisin, un courant induit *inverse*, c'est-à-dire de sens contraire au courant inducteur.

Au moment où un courant voltaïque *est interrompu*, il développe, dans un circuit fermé voisin, un courant induit *direct*, c'est-à-dire de même sens que le courant inducteur.

On obtient des résultats analogues si, au lieu d'établir et d'interrompre le courant de la pile qui traverse la bobine A, on laisse ce courant toujours établi, mais qu'on approche ou que l'on éloigne l'une des bobines de l'autre. On constate alors que, si l'on *approche* le courant inducteur du circuit fermé, il se développe un courant induit *inverse*. — Si l'on *éloigne* les deux circuits l'un de l'autre, il se produit un courant induit *direct*.

Enfin, si on laisse la bobine A immobile dans l'intérieur de la bobine B, mais que, par un moyen quelconque, on *augmente* l'intensité du courant de la pile, on obtient encore un courant induit *inverse;* si l'on *diminue* l'intensité du courant de la pile, il se produit un courant induit *direct*.

Dans toutes ces expériences, il faut bien remarquer que, tant qu'on ne fait éprouver au courant de la pile aucune variation, ni de position, ni d'intensité, l'aiguille du galvanomètre reste en repos, c'est-à-dire qu'il ne se produit aucun courant induit.

279. **Courants d'induction, produits sous l'influence des aimants**. — Un aimant pouvant être considéré comme un système de

courants (266), il est facile de prévoir, d'après ce qui précède, dans quelles circonstances les aimants pourront donner naissance à des courants induits.

Plaçons un barreau de fer doux N (*fig.* 191) dans l'intérieur d'une bobine B, semblable à la précédente, et communiquant avec le fil d'un

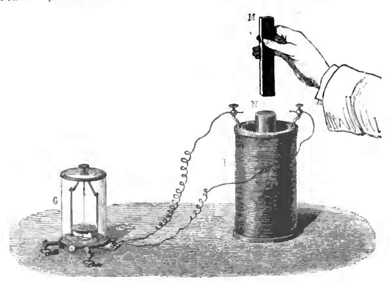


Fig. 191.

galvanomètre G : puis, approchons vivement, de l'extrémité supérieure de N, l'un des pôles d'un aimant M. Le barreau N s'aimante par influence, et l'aiguille du galvanomètre éprouve une déviation, accusant dans le fil de la bobine un courant inverse de celui des courants particuliers que l'aimantation a fait naître dans N. — Tant que l'aimant M reste immobile, il ne se produit aucun courant d'induction, et l'aiguille du galvanomètre, revenue à sa position d'équilibre, reste dans cette position. — Mais si l'on retire brusquement M, le magnétisme du fer doux disparaît, et il se produit un courant induit de même sens que les courants particulaires du fer doux.

De là les deux conclusions suivantes, tout à fait semblables à celles qui précèdent :

Au moment où un corps magnétique, placé au voisinage d'un circuit fermé, *s'aimante*, il se produit un courant induit *inverse* des courants particulaires qui prennent naissance.

Au moment où ce corps *perd son aimantation*, il se produit un courant induit *direct*, c'est-à-dire de même sens que les courants particulaires.

On constatera, par des expériences tout à fait semblables à celles qui ont été indiquées plus haut, que, si l'on *rapproche* un aimant d'un circuit fermé, ou si l'on *augmente l'aimantation*, il y a production d'un courant induit *inverse*. — Si l'on *éloigne* l'aimant, ou qu'on diminue l'aimantation, il y a production d'un courant induit *direct*.

280. **Courants d'induction, produits sous l'influence de la terre.** — La terre agissant dans les phénomènes électriques ou magnétiques, soit comme un aimant orienté du nord au sud, soit comme un courant dirigé de l'est à l'ouest (259), il est facile de prévoir encore dans quelles circonstances elle pourra donner naissance, dans des circuits fermés, à des courants induits.

Lorsqu'on fait communiquer avec un galvanomètre les deux extrémités d'une spirale métallique, et qu'on change rapidement la position de cette spirale par rapport à la direction de l'aimant terrestre, on donne naissance dans le circuit à un courant d'induction. — Le sens de ces courants pourra être facilement prévu, dans chaque cas particulier, avec les notions qui précèdent.

281. **Effets des courants induits.** — Les courants induits qui ont toujours, comme nous l'avons dit, une durée très-courte, produisent des effets qui accusent dans ces courants une intensité considérable. — Ainsi, si au lieu de fermer le circuit d'une bobine induite au moyen d'un galvanomètre, on en prend les extrémités dans les mains, en ayant soin d'assurer le contact au moyen de poignées métalliques qui offrent une grande surface, on éprouve des commotions violentes chaque fois qu'un courant induit parcourt le circuit. — La grande intensité de ces courants est d'ailleurs démontrée par les effets des machines fondées sur l'induction.

Parmi toutes ces machines, nous choisirons celle de Clarke, qui se trouve maintenant dans presque tous les cabinets de physique.

282. **Machine de Clarke.** — Les courants induits qui se produisent dans la machine de Clarke sont dus aux changements de position d'un circuit fermé, par rapport à un aimant. Une double bobine H (*fig.* 192), couverte d'un fil métallique dont les tours contigus sont isolés avec soin les uns des autres, est supportée par un axe horizontal A, qui traverse la planche P : cet axe peut recevoir un mouvement de rotation rapide, à l'aide d'une chaîne sans fin qui passe sur la roue R : dans l'axe de chacune des bobines est placé un noyau de fer doux. Un aimant très-puissant B, formé de plusieurs fers à cheval d'acier superposés, est fixé à la planche P, et ses deux pôles sont placés à peu près à la même hauteur que l'axe de rotation A, autour duquel tourne le système des bobines.

Lorsque l'on met la roue R en mouvement, à l'aide d'une poignée qui y est fixée, l'axe A tourne sur lui-même, et entraine avec lui les bobines. — Or, dans ce mouvement, si l'une des bobines se rapproche de l'un

des pôles de l'aimant fixe, il y a à la fois aimantation de son noyau, et production d'un courant induit dans le fil de la bobine, courant dont le sens est inverse de celui des courants particulaires qui prennent naissance dans le noyau. En même temps, l'autre bobine s'approche de l'autre pôle ; et, comme ce pôle est contraire au premier, le courant induit qui se produit dans cette seconde bobine parcourrait le fil en sens contraire du précédent, si le fil était enroulé sur elle dans le même sens que sur la première : on l'enroule en sens contraire, de sorte que les deux courants induits produits au même instant par les deux pôles ont, dans le fil, la même direction, et leurs intensités s'ajoutent. On peut donc, pour se rendre compte du sens des courants induits qui parcourent le fil, considérer seulement l'une des bobines.

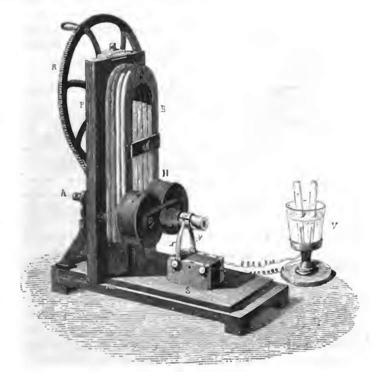


Fig. 192. — Machine de Clarke.

Or, remarquons que, au moment où l'une des bobines passe devant l'un des pôles de l'aimant, elle passe d'une série de positions qui la rapprochaient successivement de ce pôle, à une série de positions qui l'en éloignent : donc l'aimantation de son noyau, qui avait été en augmentant, commence alors à diminuer, et les courants induits qui prennent

naissance dans le fil, par la continuation du mouvement, changent de sens. — On voit donc que, si l'on a réuni les extrémités du fil des bobines, sans employer aucune disposition spéciale, de manière à fermer simplement le circuit, toutes les parties de ce circuit lui-même seront parcourues par des courants induits dont le sens changera à chaque demi-révolution des bobines.

Il est des circonstances où ce changement de sens des courants induits successifs n'a aucun inconvénient. — Par exemple, lorsqu'on veut employer la machine de Clarke à produire des commotions en prenant dans les mains les poignées M, M′ (*fig.* 193), qui communiquent avec les deux extrémités du fil ; ou à déterminer des étincelles, en établissant dans le circuit des solutions de continuité; ou bien encore à faire rougir un fil fin placé dans le circuit : dans ces divers cas, il n'y a à prendre, pour obtenir des effets satisfaisants, que quelques précautions secondaires, dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer et les changements de sens alternatifs des courants n'ont aucun inconvénient.

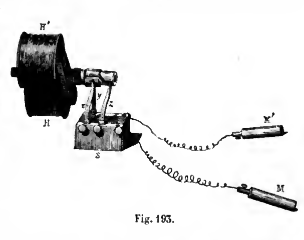


Fig. 193.

Mais si l'on se propose de décomposer de l'eau placée dans un voltamètre V (*fig.* 192), dont on aura réuni les deux fils aux extrémités du fil de l'appareil, on obtiendrait, si les courants induits qui traversent le voltamètre changeaient de sens à chaque demi-révolution, un mélange d'hydrogène et d'oxygène dans chacune des deux éprouvettes. Pour obtenir les gaz séparés dans chacune des éprouvettes, il faut adapter, sur l'axe de rotation, un *commutateur* formé de petites plaques métalliques qui sont isolées l'une de l'autre, et qui viennent toucher successivement les deux ressorts x, y auxquels aboutissent les fils du voltamètre. Ces plaques sont disposées de façon que les communications soient interverties d'elles-mêmes au moment où le sens des courants induits change, et que, par suite, ces courants traversent toujours le voltamètre dans le même sens.

LIVRE IV. — ACOUSTIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

Acoustique. — Production du son. — Le son ne se propage pas dans le vide.
Vitesse de transmission du son dans l'air.
Intensité du son. — Hauteur du son. — Sirène.

PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON.

283. **Définition.** — L'*acoustique* est la partie de la physique qui a pour objet l'étude de la production du son, de ses diverses qualités et de son mode de propagation.

284. **Production du son.** — Un son quelconque est toujours produit par un mouvement vibratoire rapide, imprimé à un corps matériel.

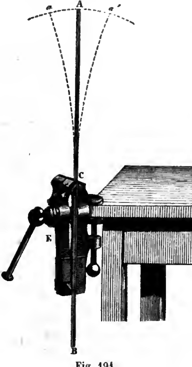


Fig. 194.

Il est des circonstances où ces mouvements vibratoires sont perceptibles à l'œil; si, par exemple, on fixe dans un étau une verge d'acier AB (*fig.* 194), en lui laissant d'abord une assez grande longueur au-dessus du point fixé C, et si, après l'avoir infléchie suivant C*a*, on l'abandonne ensuite à elle-même, on la voit revenir vers sa position d'équilibre CA, dépasser cette position et arriver dans une position symétrique C*a'*, puis revenir en C*a*, et ainsi de suite. La succession d'une allée et d'une venue de cette verge, partant, par exemple, de C*a* pour revenir en C*a*, constitue ce qu'on nomme une *vibration* complète. — Or, si la verge est assez longue, et qu'elle ne soit pas trop rigide, on peut suivre à l'œil ses mouvements et même les compter, mais on n'entend aucun son. En raccourcissant la partie vibrante, on obtient des vibrations de plus en plus

rapides, et enfin il arrive un moment où le son devient perceptible. A ce moment, on ne distingue plus les allées et venues, mais la verge semble éprouver une sorte de gonflement, qui est surtout sensible à son extrémité libre, et qui est due à la persistance des impressions lumineuses dans notre œil : le mouvement étant très-rapide, et la sensation lumineuse produite par la verge dans chacune de ses positions ayant une certaine durée, nous la voyons à la fois daus toutes ces positions successives.

Les mêmes observations ont été faites, par tout le monde, sur une corde tendue que l'on met en vibration, en l'écartant de sa position d'équilibre et l'abandonnant ensuite. On peut même, dans ce cas, en approchant l'ongle de la corde, pendant qu'elle vibre, constater le mouvement vibratoire par la série de chocs qu'elle produit. — De même, en plaçant une bille dans un timbre que l'on fait vibrer, on constate qu'elle est vivement projetée par les parois, tant que dure le mouvement vibratoire.

285. **Le son ne se propage pas dans le vide.** — Les mouvements vibratoires qui constituent les sons ne peuvent parvenir à notre oreille qu'autant qu'ils lui sont transmis par un milieu matériel. Ces mouvements ne se propagent pas dans le vide. — Pour le démontrer, il suffit de placer, au centre d'un ballon à robinet, une petite clochette S (*fig.* 195), suspendue par un fil de lin. Si le vide a été fait avec soin dans le ballon, et si on vient à l'agiter, on ne perçoit aucun son, bien qu'on voie le battant de la cloche en frapper les parois. Au contraire, si on laisse rentrer de l'air, un gaz quelconque, ou une vapeur, par le robinet R, le son devient d'autant mieux perceptible que l'on en a laissé entrer une quantité plus considérable.

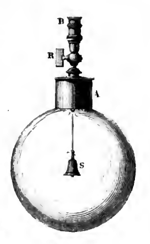


Fig. 195.

286. **Propagation du son par les divers milieux.** — C'est en général par l'intermédiaire de l'air que les sons nous parviennent : ils peuvent également se propager par les autres gaz ou par les vapeurs, comme on le constate, dans l'expérience précédente, lorsqu'on fait entrer dans le ballon un gaz quelconque, ou quelques gouttes d'un liquide qui se réduise facilement en vapeur.

Les sons se propagent encore par les liquides et par les corps solides, et l'on peut même dire que, dans ces milieux, le son perd moins vite de son intensité, pour une même distance, que dans les gaz. Chacun sait, par exemple, que, deux expérimentateurs se plaçant chacun à l'une des extrémités d'une longue poutre, si l'un d'eux vient à frapper légèrement sur le

bois, avec la pointe d'un canif, l'autre expérimentateur distingue le bruit de ces coups en appuyant l'oreille contre l'autre extrémité : au contraire, il ne perçoit plus rien dès qu'il se place dans l'air, à la même distance. — C'est ainsi encore que, en appliquant l'oreille contre terre, on distingue le roulement d'une voiture à une distance très-grande, et alors qu'il n'en parvient aucun indice par l'air.

287. **Vitesse de transmission du son dans l'air.** — Les observations les plus ordinaires apprennent que la propagation du son dans l'air n'est pas instantanée. — Nous distinguons presque immédiatement la lueur d'un coup de feu, tiré au loin dans une plaine, à quelque distance que nous en soyons placés : en effet, d'après les expériences précises qui seront indiquées plus loin, la vitesse de propagation de la lumière est si grande, qu'il est impossible de saisir, à de pareilles distances, l'intervalle qui sépare la production d'un phénomène lumineux du moment où il nous arrive. Au contraire, le bruit de l'explosion ne nous parvient jamais que quelques instants après la lueur, et l'intervalle qui sépare les deux perceptions est d'autant plus grand que la distance est plus considérable.

Des expériences ont été instituées, à diverses reprises, pour déterminer la vitesse du son dans l'air, c'est-à-dire l'espace que le son parcourt dans l'air, pendant l'unité de temps. Nous citerons, par exemple, celles qui furent exécutées, en 1822, par des membres du bureau des longitudes. — Les observateurs s'étaient partagés en deux groupes, placés l'un à Villejuif, l'autre à Montlhéry. Une pièce de canon était disposée à chacune de ces deux stations ; il avait été convenu qu'un coup de canon serait tiré, à peu près toutes les cinq minutes, tantôt à l'une des stations, tantôt à l'autre, afin d'obtenir une moyenne indépendante de la direction du vent. Chaque fois qu'un coup de canon était tiré en l'un des points, les observateurs placés à l'autre notaient, au moyen de bons chronomètres, l'instant où ils apercevaient la lumière, et l'instant où ils entendaient le bruit : l'intervalle qui séparait ces deux instants faisait connaître le temps nécessaire à la propagation du son, en supposant la transmission de la lumière instantanée. Il ne restait qu'à diviser la distance des deux stations par cet intervalle de temps, pour obtenir la vitesse du son. — Par cette méthode, on trouva, pour la vitesse du son dans l'air, à la température de 16°, le nombre 340^{m},88 par seconde.

Une formule due à Newton permet de déduire de ce résultat la vitesse de propagation du son dans l'air, à la température de zéro. Elle est de 331^{m},3 par seconde.

Il est bon de remarquer enfin que, à une même température, la vitesse de transmission des sons les plus divers est toujours la même. Il suffit, pour s'en convaincre, de remarquer que les notes d'un morceau de musique, exécutées par les divers instruments d'un orchestre, arrivent à une

grande distance sans que leur ordre de succession, ni les intervalles qui les séparent, soient en rien altérés.

288. **Vitesse du son dans les gaz, dans les liquides et dans les solides**. — La vitesse du son dans les gaz n'a pas été déterminée jusqu'ici par des expériences directes, mais par des méthodes particulières, fondées sur les lois des vibrations des tuyaux sonores. Nous n'avons pas à entrer ici dans le détail de ces méthodes. — On trouve ainsi que, dans certains gaz, tels que l'acide carbonique, la vitesse du son est un peu moindre que dans l'air. Dans l'hydrogène, elle est environ quatre fois plus grande que dans l'air.

La vitesse du son dans l'eau a été déterminée, en 1827, par MM. Sturm et Colladon, au moyen d'expériences directes, faites sur le lac de Genève. Une cloche suspendue à un bateau, et plongée dans l'eau, était frappée par un marteau : le mouvement même du manche de ce marteau mettait le feu à une certaine quantité de poudre. Sur le rivage opposé, un observateur, muni d'un cornet acoustique particulier dont le pavillon plongeait dans l'eau, notait l'instant ou il apercevait l'inflammation de la poudre, et l'instant où le son lui était transmis par l'eau. Il ne restait qu'à diviser la distance par le temps écoulé entre ces deux instants, pour avoir la vitesse du son. — On trouva ainsi, pour la vitesse du son dans l'eau, à la température d'environ 8 degrés, le nombre 1435 mètres par secondes.

La vitesse du son dans les métaux est plus grande encore. Des expériences de M. Biot, faites sur de longs tuyaux de fonte destinés à la conduite des eaux, ont montré que la vitesse du son dans la fonte de fer est environ dix fois et demie égale à la vitesse dans l'air. — Des méthodes indirectes, fondées sur les vibrations des verges solides, ont donné des nombres encore plus grands pour la vitesse du son dans l'argent, le cuivre, le fer.

La vitesse du son dans le bois, est 16 à 18 fois égale à la vitesse dans l'air.

289. **Mode de propagation du son. Ondes sonores**. — Pour bien concevoir le mode de propagation du son, nous l'étudierons d'abord dans un tuyau cylindrique indéfini. Soit MN (*fig.* 196) un tuyau cylindrique, indéfini dans les deux sens, et contenant par exemple de l'air. Supposons qu'une lame *ab*, occupant exactement la section intérieure du tuyau, se meuve de *ab* en *a'b'*, d'un mouvement semblable à celui qu'exécute, de *a* en *a'*, la verge d'acier de la figure 194. Dès que ce mouvement commence, la lame fait éprouver une compression à la tranche d'air voisine, laquelle réagit en vertu de son élasticité, transmet cette compression à la suivante, et ainsi de suite. Il en est de même pendant chacune des phases dans lesquelles on peut, par la pensée, décomposer le mouvement de *ab* en *a'b'*; en sorte que, au moment où la lame arrive en *a'b'*, la compression produite par elle au départ est arrivée à une certaine

tranche *cd* dans le tuyau, et toutes les tranches comprises entre *a' b'* et *cd* éprouvent des compressions, variables de l'une à l'autre, qui sont précisément celles qu'a produites, dans la tranche d'air voisine, le mouvement successif de la lame de *ab* en *a'b'*. Quant à l'air qui est situé au delà de *cd*, il est

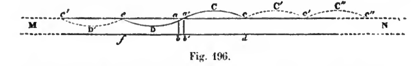


Fig. 196.

encore en repos, au moment que nous considérons. — Donc, si l'on convient de représenter les compressions éprouvées par l'air, dans les divers points du tuyau, et au moment que nous considérons, par des perpendiculaires élevées dans un même plan à l'une des arêtes du cylindre, la courbe *a'Cc* qui joint les extrémités de ces perpendiculaires représentera l'état de l'air, dans la partie du tuyau qui est située à droite, au moment où la lame parvient en *a'b'*. La colonne *a'b'cd*, qui éprouve la compression, prend le nom de ***demi-onde condensée***, et la distance *a'c* est ce qu'on nomme une ***demi-longueur d'onde***. — Si la lame restait en *a'*, les tranches d'air comprimées transmettant leur compression vers la droite, le mouvement continuerait à se propager dans le tuyau; de sorte que, au bout d'un nouvel intervalle de temps, égal à celui qu'il a fallu à la lame pour exécuter son mouvement, ce seraient les points compris entre *c* et *c'* qui éprouveraient une condensation représentée par la courbe *cC'c'*, les précédents étant revenus à l'état naturel, et ainsi de suite. C'est ce qu'on exprime d'une manière abrégée, en disant que la demi-onde condensée ***se transporte*** d'un mouvement uniforme vers la droite, dans la longueur du tuyau : il faut entendre par là, non pas une translation de l'air lui-même, mais une propagation des compressions diverses qui sont imprimées successivement, par le mouvement de la lame, à la tranche d'air voisine.

Ce même mouvement de la lame, de *ab* en *a'b'*, produit évidemment, sur la tranche d'air qui est à sa gauche, des dilatations successives : on conçoit donc qu'il sera formé à gauche, au moment où la lame arrive en *a'b'*, une demi-onde dilatée *a'b'ef*, dans laquelle l'état de l'air peut se représenter par la courbe *a'De*, obtenue en joignant les extrémités de perpendiculaires menées au-dessous de l'arête.—Au bout d'un nouvel intervalle de temps égal, ce sont les points compris entre *e* et *e'* qui éprouveront la dilatation, représentée par la courbe *eD'e'*, les précédents étant revenus à l'état naturel, et ainsi de suite. On peut donc dire, dans le même sens que plus haut, que la demi-onde dilatée ***se transporte*** d'un mouvement uniforme, vers la gauche, dans la longueur du tuyau.

Supposons maintenant que la lame, arrivée en *a'b'*, revienne sur elle-même jusqu'en *ab;* elle produira alors, pendant la durée de ce mouve-

ment, une demi-onde dilatée à droite, et une demi-onde condensée à gauche. La première se propage dans le tuyau, à la suite de la demi-onde condensée due au mouvement précédent; en sorte que l'état de l'air dans le tuyau, à droite de *a'*, et au moment où la lame revient en *a*, est représenté par la courbe *a'*GcHc' (*fig.* 197). De même l'état de l'air dans le

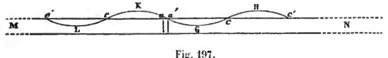


Fig. 197.

tuyau, à gauche de *a'*, et au même instant, est représenté par la courbe *a'*KeLe' — En d'autres termes, après une *vibration complète* de la lame, le tuyau contient à droite une onde entière, formée d'une demi-onde dilatée et d'une demi-onde condensée; à gauche, une onde entière, formée d'une demi-onde condensée et d'une demi-onde dilatée.

Si l'on conçoit maintenant que le mouvement se continue, comme c'est le cas pour les corps sonores, une série d'ondes successives se propageront à droite et à gauche, et à la suite les unes des autres; pour figurer l'état de l'air dans le tuyau à chaque instant, il suffira de transporter les courbes précédentes parallèlement à elles-mêmes et d'un mouvement uniforme.

Ce qui vient d'être dit de la propagation du son, dans un tuyau cylindrique indéfini, s'applique à la propagation dans un espace indéfini en tous sens, en admettant ce fait, établi par l'expérience, que les vibrations d'un corps sonore se transmettent dans toutes les directions avec une vitesse constante, et avec la même vitesse que dans un tuyau. — Donc, pendant la première vibration, le mouvement se communique à tous les points d'une sphère ayant pour centre le corps sonore et pour rayon la longueur d'ondulation : c'est l'espace compris dans cette sphère qui constitue la première onde sonore. Puis, après un nouvel intervalle de temps égal, le mouvement est communiqué aux points compris entre la surface de cette sphère et celle d'une seconde sphère d'un rayon double : c'est cet espace qui constitue la deuxième onde; et ainsi de suite.

Il est seulement important de remarquer que, dans ce dernier cas, la masse d'air qui constitue les ondes successives allant toujours en augmentant, à mesure que l'on considère des ondes plus éloignées, les compressions ou les dilatations qu'elles éprouvent doivent diminuer d'intensité. On s'explique ainsi comment, dans un milieu indéfini, l'intensité du son va en diminuant à mesure qu'on s'éloigne du corps sonore : c'est ce que montre l'expérience de chaque jour. — Il n'en est pas de même dans un tuyau cylindrique : la masse d'air qui constitue l'onde étant constante, le son n'éprouve qu'un affaiblissement insensible à une dis-

tance de son point de départ; cette dernière remarque explique l'emploi de ces tubes en caoutchouc que l'on emploie maintenant pour faire parvenir la voix, sans diminution notable d'intensité, à de grandes distances.

290. **Intensité du son.** — Lorsque toutes les conditions extérieures restent les mêmes, l'intensité des sons qui parviennent à notre oreille dépend de l'amplitude des vibrations du corps sonore. — C'est ce qu'il est facile de vérifier en faisant vibrer une corde tendue : selon qu'on l'écarte plus ou moins de sa position d'équilibre, elle rend un son plus ou moins intense Si on la laisse vibrer pendant un certain temps, l'oreille constate une diminution progressive d'intensité, en même temps que l'œil voit les vibrations diminuer d'amplitude.

291. **Hauteur du son — Sirène.** — La *hauteur* d'un son, c'est-à-dire son degré d'acuïté ou de gravité, dépend du nombre de vibrations qu'effectue le corps sonore dans un temps déterminé.

Plusieurs méthodes ont été employées par les physiciens pour déterminer les nombres de vibrations effectuées par les corps sonores : or, dans toutes les circonstances où l'on peut compter les nombres de vibrations de divers sons, on constate que deux sons *de même hauteur* ou *à l'unisson* correspondent toujours à des *nombres égaux de vibrations dans le même temps.* — On constate de la même manière que, de deux sons de hauteurs différentes, c'est toujours *le plus haut* qui correspond au *plus grand nombre des vibrations dans le même temps.* Cette dernière proportion se démontre d'ailleurs immédiatement au moyen de la sirène, que nous allons maintenant décrire.

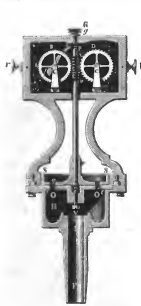


Fig. 198. — Sirène.

La *sirène*, dont l'invention est due à Cagniard de Latour, est représentée en coupe verticale par la figure 198. Il est une caisse cylindrique de laiton, dans laquelle on insuffle de l'air par le tube F, à l'aide d'une soufflerie que nous aurons l'occasion de décrire plus loin (*fig.* 201). La base supérieure de la caisse est un plateau circulaire horizontal *tt*, percé d'un certain nombre de petits trous O, O, lesquels sont également espacés sur une circonférence. Un plateau SS, mobile autour d'un axe d'acier vertical, est placé parallèlement au plateau fixe et à une petite distance : il est percé de trous, en nombre égal à ceux du premier, et leur correspondant exactement. — Ces trous ont leurs axes obliques par rapport aux plans des plateaux,

mais les trous du plateau supérieur sont inclinés en sens contraire de ceux du plateau inférieur; c'est ce que montre la figure 199, qui représente une section verticale des deux plateaux, par un plan situé en avant du plan de la figure précédente, et passant par les axes de deux ouvertures *u*, *u'* correspondantes.

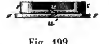


Fig. 199.

Supposons que, au commencement d'une expérience, les trous du plateau supérieur correspondent exactement à ceux du plateau fixe; l'air, amené par la soufflerie dans la caisse H, peut s'écouler par chacun des canaux coudés *uu'* (*fig.* 199) : mais, en arrivant contre la paroi du canal *u*, il exerce sur elle une pression qui met en mouvement le plateau mobile. Les deux systèmes d'ouvertures cessent donc de coïncider; mais la coïncidence se rétablit lorsque le plateau supérieur a tourné d'un angle égal à celui qui correspond à l'intervalle de deux trous consécutifs; l'air s'échappe alors de nouveau, communique au plateau supérieur une nouvelle impulsion qui accélère son mouvement, et ainsi de suite. — Si, en faisant arriver l'air rapidement au moyen de la soufflerie, on augmente progressivement la vitesse de rotation, on entend un son qui est d'abord très-grave, mais qui s'élève à mesure que la vitesse augmente, jusqu'à devenir parfois très-aigu. Ce son est dû à la sortie périodique de l'air, comme il est facile de s'en rendre compte.

Supposons qu'on opère avec une sirène portant 20 trous sur chacun de ses plateaux. — Si le plateau supérieur n'avait qu'un seul trou, ce trou unique viendrait, à chaque tour, se mettre successivement en coïncidence avec les 20 trous du plateau fixe, de sorte que, à chaque tour, la sortie de l'air serait 20 fois établie et interrompue : de là des impulsions périodiques, communiquées à l'air extérieur, lequel réagit ensuite, en vertu de son élasticité, dès que cette impulsion cesse; de là, en d'autres termes, un mouvement vibratoire, produisant un son. Enfin, si le plateau mobile porte 19 autres trous, au moment où le précédent établira une coïncidence, tous les autres correspondront également à des ouvertures du plateau fixe : par suite, la sortie de l'air s'effectuera à la fois par 20 ouvertures, mais elle ne sera encore établie et interrompue que 20 fois pendant un tour du plateau mobile; il n'y aura encore que 20 vibrations produites dans l'air extérieur, à chaque tour du plateau. Le son aura donc une intensité plus grande, mais il conservera la même hauteur, si la vitesse du plateau reste la même.

Pour pouvoir compter les nombres de vibrations qui correspondent aux divers sons, on a pratiqué, à la partie supérieure de l'axe de rotation du plateau mobile, un filet de vis V*v* (*fig.* 198), qui engrène avec une roue dentée B, dont la circonférence porte 100 dents : à chaque tour du plateau, cette roue avance d'une dent, et fait marcher d'une division une aiguille placée à l'extérieur, et mobile sur un cadran; la circonférence

du cadran est partagée en 100 divisions. Une seconde roue D, portant également sur son axe une aiguille qui se meut sur un cadran extérieur, est destinée à compter les centaines de tours : pour cela, on a fixé à l'axe de la roue B un appendice L*l*, dont l'extrémité L arrive en contact avec une dent de D, chaque fois que la roue B a fait un tour entier ; la roue D avance alors d'une dent, et l'aiguille qu'elle porte marche d'une division. — Enfin, il est utile de pouvoir, à volonté, faire engrener la roue B avec la vis V*v*, ou interrompre l'engrenage : pour cela, la plaque métallique qui porte les roues B et D reçoit un petit mouvement de gauche à droite ou de droite à gauche, selon qu'on presse le bouton *r* ou le bouton R : on rapproche ou l'on éloigne ainsi les dents de la roue B du filet de la vis V*v*.

Lorsqu'on veut, avec la sirène, déterminer le nombre de vibrations d'un son quelconque, on place l'instrument sur la soufflerie, les deux aiguilles étant aux zéros de leurs cadrans, et l'engrenage n'étant pas en prise. On donne le vent, et on le règle de manière à amener le son de la sirène à l'unisson de celui qu'on se propose d'étudier ; on presse alors le bouton *r*, pour établir l'engrenage, et l'on note cet instant sur une montre à secondes. On maintient l'unisson aussi longtemps que possible, pendant quelques minutes, par exemple, et enfin on termine l'expérience en poussant le bouton R, et notant encore cet instant. On connaît ainsi le nombre de tours effectués par le plateau en un temps déterminé : il est facile d'en déduire le nombre de vibrations par seconde, qui correspond au son produit. — En effet, supposons, par exemple, que, après une expérience qui a durée 2 minutes 10 secondes, ou 130 secondes, l'aiguille des tours marque 30 et que l'aiguille des centaines marque 27. Le plateau ayant fait 2730 tours, s'il a 20 trous, il s'est produit, en tout, 2730×20 ou 54 600 vibrations ; par suite, en une seconde $\frac{54600}{130}$, ou 420 vibrations.

292. **Timbre des divers sons.** — Il y a souvent, entre les sons produits par divers corps, une différence qui n'est, ni une différence de hauteur, ni une différence d'intensité, et qui tient à ce qu'on nomme le *timbre*. C'est ainsi, par exemple, qu'une même note, donnée avec la même intensité par une trompette, par un violon et par la voix humaine, nous offre un caractère parfaitement distinct dans ces trois circonstances. — Les timbres des divers corps, auxquels il est si important d'avoir égard au point de vue des effets musicaux, tiennent à des causes qui ne sont pas encore assez connues pour que nous devions entrer dans aucun détail à ce sujet.

CHAPITRE II.

Vibrations des cordes. — Gammes et intervalles musicaux. — Accord parfait.
Vibrations longitudinales des verges. — Plaques.
Tuyaux sonores [1].

GAMMES ET INTERVALLES MUSICAUX.

293. **Définitions.** — Deux sons d'inégale hauteur diffèrent entre eux, comme nous l'avons vu, par le nombre des vibrations qu'ils exécutent dans le même temps. — On appelle *intervalle* de deux sons *le rapport des nombres de vibrations qui leur correspondent, dans des temps égaux.* Ainsi, si deux sons correspondent, l'un à 400 vibrations par seconde, l'autre à 300 vibrations par seconde, l'intervalle de ces deux sons est $\frac{4}{3}$.

Si deux sons correspondent à un même nombre de vibrations dans le même temps, ce qui constitue l'*unisson*, leur intervalle est égal à l'unité.

On dit qu'un son est à l'*octave aiguë* d'un autre, lorsqu'il correspond à un nombre de vibrations *double* dans le même temps. L'intervalle de ces deux sons est alors égal à 2.

La production simultanée de deux sons produit, sur l'oreille, tantôt une sensation agréable, tantôt une sensation désagréable. Or, si l'on calcule l'intervalle de ces deux sons, en déterminant les nombres de vibrations qui leur correspondent dans le même temps, divisant l'un par l'autre, et réduisant la fraction résultante à sa plus simple expression, on trouve que les termes de cette fraction sont représentés par des nombres d'autant plus petits que la consonnance est plus agréable. — Aussi les nombres de vibrations des sons que les musiciens font entendre simultanément sont-ils en général dans des rapports très-simples.

294. **Gamme.** — On donne le nom de *gamme* à une série de sons ou *notes*, au nombre de sept, et dont les intervalles sont rigoureusement déterminés. — Ces notes ont été désignées par les noms *ut, ré, mi, fa, sol, la, si,* qui suffisent, comme nous allons le montrer, pour représenter tous les sons employés en musique.

Si, pour plus de simplicité, on prend pour unité le nombre de vibrations qui correspond à la première note, ou, ce qui revient au même, si l'on divise les nombres de vibrations des notes suivantes par le nombre de vibrations de la première, on obtient :

Notes..........	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*
Nombres de vibrations.	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$

[1] Pour ce qui concerne la structure et les fonctions de l'oreille, nous renverrons à la *Zoologie*, page 56.

diqués, on peut se proposer de former, avec les notes mêmes de ces gammes, de nouvelles gammes dans lesquelles on prendrait pour toniques d'autres notes que les octaves de celle qui a été prise pour point de départ. — Alors, si l'on veut conserver, entre les notes de ces nouvelles gammes, les mêmes intervalles que dans la gamme fondamentale, on est amené à intercaler quelques nouveaux sons entre ceux qui ont été définis : on est ainsi conduit à la considération des ***dièzes*** et des ***bémols***.

C'est ainsi, par exemple, que si l'on veut passer de la gamme d'***ut*** à une gamme qui aurait pour tonique la quinte d'***ut***, c'est-à-dire ***sol***, et former une gamme dont les notes soient ***sol***, ***la***, ***si***, ***ut***, ***ré***, ***mi***, ***fa***, on trouve que le sixième intervalle (***mi*** à ***fa***), au lieu d'être d'un ton, comme dans la gamme d'***ut***, n'est que d'un demi-ton. Si donc on veut, avec ***sol*** pour tonique, conserver les intervalles qui caractérisent la gamme, il est nécessaire de substituer, à la note précédente *fa*, une note plus élevée. On emploie alors une note dont le nombre de vibrations s'obtient en multipliant celui de *fa* par $\frac{25}{24}$; la nouvelle note prend le nom de ***fa dièze***, et s'indique par *fa* ♯.

On verra de même que, en prenant pour tonique la quinte de cette gamme de ***sol***, c'est-à-dire ***ré***, et cherchant à former une gamme dont les notes soient ***ré***, ***mi***, ***fa***, ***sol***, ***la***, ***si***, ***ut***, on sera conduit à substituer, à la note ***ut***, une note plus élevée, c'est-à-dire ***ut*** ♯, et ainsi de suite.

Des conditions analogues conduisent à l'introduction des ***bémols***. — Proposons-nous, par exemple, de former une gamme en prenant pour tonique la quarte d'***ut***, c'est-à-dire *fa;* nous serons conduits à une gamme dont les notes seront *fa*, ***sol***, ***la***, ***si***, ***ut***, ***ré***, ***mi***. Mais, dans cette gamme, le troisième intervalle (*la* à ***si***), qui devrait être d'un demi-ton, est d'un ton; le quatrième intervalle, qui devrait être d'un ton, n'est que d'un demi-ton. On rendra à ces deux intervalles les valeurs qu'ils doivent avoir, en substituant, à la note ***si***, une note plus basse, dont on obtiendra le nombre de vibrations en multipliant celui de *si* par $\frac{24}{25}$: cette nouvelle note prend le nom de ***si bémol***, et s'indique par ***si*** ♭.

On verra de même que, en prenant pour tonique la quarte de cette gamme de *fa*, c'est-à-dire ***si*** ♭, et cherchant à former une gamme dont les notes soient ***si*** ♭, ***ut***, ***ré***, ***mi***, ***fa***, ***sol***, ***la***, on sera conduit à substituer à la note *mi*, une note plus basse, c'est-à-dire ***mi*** ♭, et ainsi de suite.

296. **Accord parfait.** — On donne le nom d'*accord parfait* à la consonnance formée par la réunion de trois notes, dont les intervalles sont ceux qui existent entre la ***tonique*** d'une gamme, sa ***tierce*** et sa ***quinte :*** ces intervalles sont donc $\frac{4}{5}$ et $\frac{3}{2}$. L'accord parfait produit sur l'oreille une sensation plus agréable que la consonnance formée par la réunion

de trois autres sons quelconques, dont les intervalles seraient différents.

Ainsi les notes *ut*, *mi*, *sol* forment un accord parfait. — D'après ce qui a été dit plus haut, il en est de même des notes *ré*, *fa* ♯, *la*. — Il en est de même encore des notes *si* ♭, *ré*, *fa*; etc.

297. **Nombres absolus de vibrations des notes employées en musique.** — Nous avons considéré jusqu'ici l'échelle musicale comme formée de notes dont les intervalles seuls étaient déterminés, mais dont le point de départ restait arbitraire; or, on conçoit qu'il soit nécessaire, dans la pratique, de fixer ce point de départ, afin que la valeur absolue de chaque son soit déterminée d'une manière précise.

D'après les conventions adoptées en France, l'*ut* le plus grave du violoncelle correspond à 65,25 vibrations par seconde; on le désigne, en acoustique, par ut_1. Les notes comprises entre ut_1 et son octave aiguë sont désignées de même par l'indice 1. Les notes de l'octave suivante sont désignées par l'indice 2; et ainsi de suite. — Les notes comprises dans les octaves inférieures à ut_1 sont désignées de même, d'octave en octave, par les indices —1, —2, etc.

Ordinairement, pour accorder les instruments, on se sert d'un diapason formé de deux branches d'acier, dont l'intervalle va en diminuant vers leur extrémité libre. On peut le mettre en vibration, soit à l'aide d'un petit cylindre de bois ou de métal, qu'on fait passer de force dans l'intervalle de ses branches (*fig.* 200), soit au moyen d'un archet. — Le diapason normal donne la note la_3, dont la valeur a été fixée récemment à 435 vibrations par seconde.

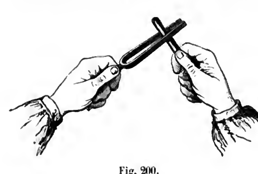


Fig. 200.

VIBRATIONS DES CORDES ET DES VERGES. — PLAQUES.

298. **Vibrations transversales des cordes.**—Pour étudier les lois des vibrations transversales des cordes, on les tend sur un instrument qui porte le nom de *sonomètre*, et que nous allons d'abord décrire.

Une caisse en bois de sapin MN (*fig.* 201), porte sur sa face supérieure, au voisinage de ses extrémités, des chevalets fixes B, B', séparés l'un de l'autre par une distance d'un mètre. Sur ces chevalets s'appuie une première corde métallique, tendue entre les chevilles *a* et *d*: la clef *p* per-

met de régler à volonté la tension de cette corde, et, par suite, le son qu'elle rend quand on la fait vibrer. A la cheville *b* est assujettie une autre corde métallique, qui, s'appuyant sur les chevalets B′, B, vient passer sur la poulie de renvoi R, et soutient en P un poids. — De petits chevalets mobiles, tels que C, peuvent être placés sous les cordes, et permettent de limiter à volonté la longueur des parties vibrantes : une règle divisée en millimètres détermine les diverses positions de ces chevalets. — Pour produire les vibrations transversales, on ébranle les cordes, soit en les pinçant, c'est-à-dire en les écartant de leur position d'équilibre avec les doigts, et les abandonnant ensuite à elles-mêmes, soit en les frottant avec un archet, perpendiculairement à leur direction.

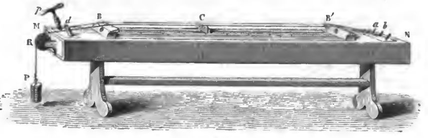


Fig. 201.

Pour retrouver facilement les lois des vibrations transversales des cordes, il est commode de se souvenir que ces lois sont toutes comprises dans la formule suivante :

$$n = \frac{1}{2\,r\,l}\sqrt{\frac{g\,P}{\pi\,d}}$$

dans laquelle n désigne le nombre des vibrations effectuées dans une seconde ; r le rayon de la corde et l sa longueur, en mètres ; d sa densité ; P le poids tenseur, exprimé en kilogrammes ; g l'accélération due à la pesanteur, dont la valeur à Paris est $9^{m},8088$, et π le rapport constant de la circonférence au diamètre.— On voit, d'après cette formule, que, pour les expériences faites en un même lieu, il y a quatre quantités variables, dont dépend la valeur du nombre n de vibrations ; ce sont r, l, P, et d. De là les quatre lois suivantes :

1° *Toutes choses égales d'ailleurs, les nombres de vibrations exécutées par deux cordes sont en raison inverse de leurs longueurs.*

Pour démontrer par l'expérience cette loi, la *loi des longueurs*, on fait vibrer d'abord, dans toute sa longueur, une corde fixée sur le sonomètre, et tendue par des poids arbitraires ; au moyen de la clef *p*, on accorde, par des tâtonnements, la corde fixe, de manière à la mettre à l'unisson. Si l'on place alors le chevalet mobile C au milieu de la première corde, et qu'on fasse vibrer l'une des moitiés de cette corde, en

comparant le son qu'elle rend au précédent, c'est-à-dire à celui que rend toujours la corde fixe, on constate que le second son est l'*octave aiguë* du premier : en d'autres termes le nombre de vibrations est double (293). Donc, dans ce cas, les nombres de vibrations sont en raison inverse des longueurs. — On vérifiera de même que, si l'on prend une longueur égale aux $\frac{2}{3}$ de la corde, on obtiendra la *quinte* du premier son : or, le nombre de vibrations de cette note est les $\frac{3}{2}$ du nombre de vibrations du premier, ce qui vérifie encore la loi, et ainsi de suite.

2° *Toutes choses égales d'ailleurs, les nombres de vibrations exécutées par deux cordes sont en raison inverse de leurs diamètres.*

Pour démontrer par l'expérience cette loi, la loi des *diamètres*, on prendra deux cordes de même nature, la seconde ayant un diamètre égal à la moitié de celui de la première. La première étant fixée sur le sonomètre, et tendue au moyen d'un certain poids, on mettra la corde fixe à l'unisson avec elle ; puis, on lui substituera la seconde corde, en employant le même poids tenseur. En comparant le son rendu à celui de la corde fixe, on constatera qu'il est à l'*octave aiguë* du premier ; c'est-à-dire qu'il correspond à un nombre de vibrations double de celui du premier. — En employant des cordes de diamètres divers, on obtiendra des résultats semblables.

3° *Toutes choses égales d'ailleurs, les nombres de vibrations exécutées par une même corde sont proportionnels aux racines carrées des poids tenseurs.*

Pour démontrer expérimentalement cette loi, la *loi des tensions*, on tend une corde en *b* R sur le sonomètre, et on la charge en P d'un poids suffisant pour qu'elle rende un son facile à discerner : on met la corde fixe *a d* à l'unisson avec elle. Cela fait, on met en P une charge quatre fois plus considérable : on obtient un son qui est l'octave aiguë du premier, c'est-à-dire dont le nombre de vibrations est deux fois plus grand. — Ainsi de suite, avec diverses charges.

4° *Toutes choses égales d'ailleurs, les nombres de vibrations de deux cordes de natures différentes sont en raison inverse des racines carrées de leurs densités.*

Pour le démontrer, on fait usage de deux cordes de même diamètre, mais de nature différente, de cuivre et d'argent par exemple. On les charge de poids égaux, et l'on détermine le rang occupé, dans l'échelle musicale, par les sons qu'elles produisent ; par suite, les nombres de vibrations qui leur correspondent. On constate alors que ces nombres sont en raison inverse des racines carrées des densités.

299. **Sons harmoniques. — Nœuds et ventres.** — Lorsqu'on attaque une corde AB (*fig.* 202), au moyen de l'archet, dans le voisinage de son milieu M, le gonflement apparent que cette corde éprouve pour l'œil montre que tous ses points vibrent perpendiculairement à sa lon-

gueur : d'ailleurs, si l'on a placé en ses divers points de petits chevrons de papier, avant de mettre la corde en vibration, on voit qu'ils sont tous renversés

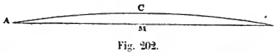


Fig. 202.

dès qu'elle est ébranlée. — Le son que rend la corde dans cette circonstance, est ce qu'on nomme le ***son fondamental***.

Si maintenant on presse légèrement avec le doigt sur le milieu de la corde, et si l'on attaque avec l'archet l'une des deux moitiés, par exemple la moitié A'M' (*fig.* 203), on obtient un son que l'on reconnaît pour l'octave aiguë du son fondamental, et qui, par suite, correspond à un nombre



Fig. 203.

double de vibrations dans le même temps. Or, dans ce cas, le milieu M' de la corde, maintenu par la pression du doigt, ne peut entrer en vibration ; mais on constate facilement que la seconde moitié M'B' vibre en même temps que la première, car l'œil y constate le même gonflement apparent, et les petits chevrons de papier qu'on y a placés sont renversés, quand on attaque un point situé au voisinage du milieu I de A'M'. — La corde se partage donc en deux moitiés, qui vibrent séparément, comme deux cordes de longueur moitié moindre.

De même, si l'on presse avec le doigt sur le point D (*fig.* 204), qui partage la corde au tiers, et si l'on attaque avec l'archet un point de A''D,

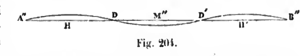


Fig. 204.

on obtient un son qui est la quinte de l'octave du son fondamental, et qui, par suite, correspond à un nombre triple de vibrations dans le même temps. On constate alors que le point D', qui limite le second tiers de la corde, reste immobile comme le point D, et qu'un chevron placé en ce point y demeure sans être branlé : au contraire les points compris dans l'intervalle de D et D', et dans l'intervalle de D' et B'', entrent en vibration. — La corde se partage donc en trois parties égales, vibrant séparément, comme trois cordes de longueur trois fois moindre.

On obtient des résultats analogues en partageant la corde en parties aliquotes quelconques de sa longueur.

Dans toutes ces expériences, on peut constater que les subdvisions contiguës de la corde, telles que A'IM' et M'I'B', (*fig.* 203), ou bien A''HD et DM''D' (*fig.* 204) vibrent en sens contraire, c'est-à-dire que, tandis que

A'M' par exemple s'infléchit d'un côté de sa position d'équilibre, M'B, s'infléchit de l'autre côté, et réciproquement.

Les points qui limitent les parties vibrantes, et qui restent immobiles, comme les extrémités A, B de la corde, ou les points M', D, D', sont appelés *nœuds* de vibration. — Les milieux des parties vibrantes, où l'amplitude des vibrations est maximum, sont appelés *ventres* de vibration.

Les divers sons qu'on peut faire rendre à une même corde par le procédé que nous venons d'indiquer, sans modifier sa tension, sont appelés les sons *harmoniques* de la corde. — Il résulte de leur mode même de production que leurs nombres de vibrations varient *comme la suite des nombres naturels* 1, 2, 3, 4, 5...

Remarque. — Lorsqu'on fait vibrer une corde un peu longue, sans exercer aucune pression dans l'intervalle de ses deux extrémités, une oreille un peu exercée perçoit toujours, en même temps que le son fondamental, un ou plusieurs des harmoniques de la corde. — Pour expliquer ce phénomène, il suffit d'admettre que la corde, en même temps qu'elle vibre en totalité, se subdivise en un certain nombre de parties, dont chacune vibre autour de ses extrémités propres comme si elles étaient fixes.

300. **Vibrations longitudinales des cordes.** — On peut faire vibrer les cordes dans le sens de leur longueur, en les frottant longitudinalement avec un morceau de drap saupoudré de colophane.

Les sons fondamentaux produits de cette manière sont toujours très-aigus, par rapport à ceux que donnent les vibrations transversales. — Les lois suivant lesquelles varient les nombres de vibrations des sons fondamentaux, avec la longueur, le diamètre et la densité de la corde, sont les mêmes que pour les vibrations transversales (298, 1°, 2° et 4°); mais ils sont indépendants de la tension de la corde.

Les nombres de vibrations des harmoniques d'une même corde peuvent être représentés, comme pour les vibrations transversales (299), par la série des nombres naturels.

301. **Vibrations longitudinales des verges.** — Pour déterminer des vibrations longitudinales dans une verge de bois, de métal ou

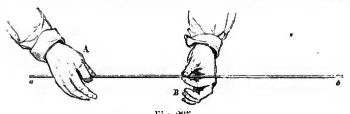


Fig. 205.

de verre, il suffit de la saisir par son milieu B (*fig.* 205), et de frotter l'une des moitiés B*a* avec les doigts enduits de colophane.

L'expérience peut se faire autrement encore, en fixant solidement le milieu d'une barre rigide en K (*fig.* 206), et frottant la moitié KB avec un morceau de drap mouillé *ab*. Pour bien montrer que les vibrations s'effectuent dans le sens de la longueur de la verge, on peut appuyer,

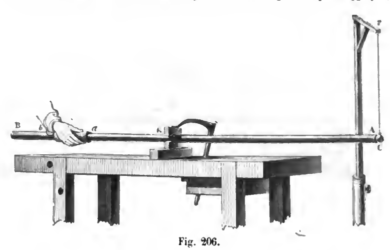


Fig. 206.

contre l'extrémité A de la tige, une bille d'ivoire C suspendue à un fil. Dès que la tige est mise en vibration, la bille d'ivoire est vivement projetée vers la droite.

Les verges peuvent d'ailleurs être assujetties de plusieurs autres façons, par exemple, par une de leurs extrémités, ou par les deux extrémités à la fois.

Dans tous les cas, les vibrations longitudinales sont soumises à la loi suivante :

Quel que soit le mode d'assujettissement des verges, pourvu que l'on ne compare jamais entre eux que les sons fondamentaux de plusieurs verges de même nature et semblablement assujetties, on trouve que leurs nombres de vibrations sont ***en raison inverse des longueurs.***

Quant à la loi de succession des harmoniques d'une même verge, elle dépend du mode d'assujettissement.

1° Si deux extrémités sont ***toutes deux libres***, ou ***toutes deux fixées***, les nombres de vibrations du son fondamental et des harmoniques d'une même verge peuvent être représentés, comme pour les cordes (299), par ***la série des nombres naturels*** 1, 2, 3, 4, 5... — C'est aussi, comme nous le verrons, la loi des harmoniques d'un tuyau ouvert.

2° Si ***l'une des extrémités est fixée et l'autre libre***, les nombres de vibrations du son fondamental et des harmoniques d'une même verge peuvent être représentés par ***la série des nombres impairs*** 1, 3, 5, 7... —

C'est aussi, comme nous le verrons, la loi des harmoniques d'un tuyau fermé.

502. **Vibrations des plaques**. — Pour étudier les vibrations des plaques, on emploie généralement des plaques polygonales ou circulaires (*fig.* 207), fixées sur un pied par leur centre de figure. On les fait vibrer en frottant avec l'archet un des points de leur contour, et on appuie for-

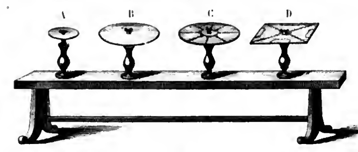


Fig. 207.

tement avec le doigt sur un autre point. Selon que ces deux points occupent telle ou telle position, on obtient tel ou tel son. — Or, si l'on couvre préalablement la plaque de sable fin, on voit ce sable prendre des mouvements rapides qui le portent vers certaines lignes, où il s'accumule et demeure ensuite en repos. Les divers points de ces lignes sont évidemment des nœuds de vibrations : elles ont reçu le nom de *lignes nodales;* l'une d'elles passe toujours par le point qu'on a rendu fixe en le touchant avec le doigt. La figure 207 représente, sur les deux plaques C, D, des figures de lignes nodales ainsi produites.

Pour les plaques circulaires et homogènes fixées par leur centre, les figures nodales sont toujours des diamètres ou des circonférences concentriques avec les bords de la plaque. — Quelquefois ce sont des combinaisons de diamètres et de circonférences, comme le représente la figure 207, pour la plaque C.

Pour les plaques carrées et homogènes, fixées par leur centre, les figures nodales sont des combinaisons de lignes droites, parallèles aux diagonales ou aux côtés de la plaque.

503. **Loi des dimensions homologues, pour les plaques semblables**. — En comparant entre eux les sons rendus par des plaques semblables et correspondant à un même mode de subdivision, c'est-à-dire à une même figure nodale, on arrive à la loi suivante :

Deux plaques semblables, et vibrant semblablement, produisent des sons dont les nombres de vibrations sont inversement proportionnels aux dimensions homologues. — C'est ainsi que deux plaques circulaires, dont l'une B aura un diamètre double de l'autre A, et qui seront ébranlées de

manière à produire la même figure nodale, donneront des sons dont le second sera à l'octave aiguë du premier.

TUYAUX SONORES.

304. **Tuyaux à bouche. — Production du son dans ces tuyaux.** — Les sons rendus par les tuyaux sonores sont dus, à peu près exclusivement, aux vibrations de l'air qu'ils contiennent. Dans les tuyaux *à bouche*, que nous considérerons d'abord, on introduit un courant d'air plus ou moins rapide par le *pied p* (*fig.* 208) : cet air, arrivant dans une caisse qui fait suite au conduit *p* (*fig.* 209), traverse une fente étroite *l*, qu'on nomme la *lumière*, et vient se briser contre la lèvre supérieure *b* : une partie pénètre dans l'intérieur du tuyau T, comprimant les couches d'air qu'il contient. Puis l'air intérieur réagit en vertu de son élasticité, et se dilate; il est ensuite comprimé de nouveau : cette succession de condensations et de dilatations donne lieu à un mouvement vibratoire, qui se propage dans l'intérieur du tuyau, et produit un son.

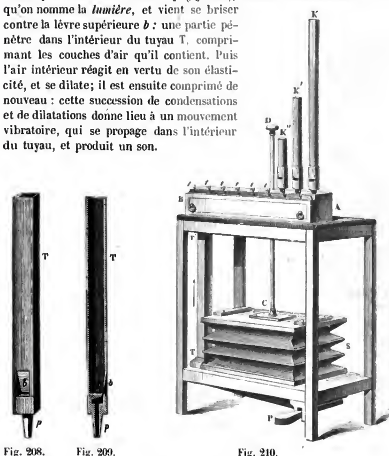


Fig. 208. Fig. 209. Fig. 210.

Pour introduire plus facilement l'air dans les tuyaux, d'une manière continue, on emploie ordinairement une *soufflerie* (*fig.* 210). Un soufflet S,

que l'on gonfle en faisant mouvoir la pédale P, amène l'air, par un tube TT', dans la caisse rectangulaire AB, qu'on appelle le *sommier*. La face supérieure de cette caisse est munie d'un certain nombre de trous, dans lesquels s'engagent les pieds des tuyaux, et que l'on débouche à l'aide de petites soupapes à ressorts, en pressant sur les touches *t*, *t*, *t* .. — Pour accélérer à volonté l'arrivée de l'air dans les tuyaux, il suffit d'appuyer avec la main sur la tige DC, qui comprime le soufflet,

Plusieurs expériences, qui seront indiquées plus loin, démontrent la production des vibrations dans l'air intérieur. — Quant aux parois du tuyau, elles ne participent aux vibrations de la colonne d'air que si leur épaisseur est très-faible, ce qui n'est pas le cas ordinaire. En effet, si l'on monte, sur une soufflerie, des tuyaux dont les dimensions intérieures soient exactement égales, on constate que des tuyaux façonnés avec différents bois, ou avec divers métaux, rendent le même son. Au contraire, un tuyau de mêmes dimensions, mais ayant ses parois en papier ou en carton mince, donne toujours un son plus grave : ce son s'abaisse encore si l'on vient à rendre les parois plus flexibles, en les mouillant. — Il ne sera question, dans ce qui va suivre, que des tuyaux dont les parois sont assez épaisses et assez rigides pour qu'on n'ait pas à tenir compte des vibrations de ces parois elles-mêmes.

305. **Nœuds fixes et ventres fixes.** — Les tuyaux à bouche sont de deux espèces : les uns sont *fermés*, c'est-à-dire que l'extrémité opposée à la bouche est fermée par une paroi solide; les autres sont *ouverts*. Or, lorsqu'on étudie les phénomènes qui doivent se produire à l'extrémité du tuyau, dans l'une ou l'autre espèce, la théorie montre que les ondes sonores, en arrivant à ce point, doivent éprouver une réflexion, donnant lieu à une onde qui revient en sens inverse. Ces deux mouvements, qui continuent ensuite à se propager dans la colonne d'air intérieure, comme les ondes circulaires qui se traversent, sans se troubler, à la surface d'une eau tranquille, produisent sur chacune des tranches intérieures un mouvement résultant; la vitesse de ce mouvement est la somme ou la différence des vitesses composantes, suivant que celles-ci sont de même sens ou de sens contraire.—De même, la compression ou la dilatation que produirait, en un point donné et à un moment donné, l'un des deux systèmes d'ondes, en se combinant avec l'effet que produirait l'autre système au même point et au même instant, peut produire une condensation ou une dilatation plus grande, ou bien maintenir l'air à l'état naturel.

Par des considérations de cet ordre, on démontre théoriquement qu'il doit se former, dans l'intérieur d'un tuyau vibrant, 1° des *nœuds fixes*, c'est-à-dire des tranches où la vitesse de vibration est constamment nulle, mais où la compression ou la dilatation est plus grande que dans les autres points du tuyau, au même instant ; 2° des *ventres fixes*,

c'est-à-dire des tranches où la vitesse de vibration est toujours plus grande que dans les points voisins, mais où il n'existe ni compression, ni dilatation.

Ces conclusions de la théorie sont confirmées par les expériences suivantes :

Un tuyau ouvert T (*fig.* 211), dont l'une des faces est formée par une lame de verre, étant monté sur la soufflerie, on le fait parler, et l'on introduit dans l'intérieur une membrane de baudruche, tendue sur un anneau rigide S que soutient un fil de soie. Si cette membrane a été préalablement couverte de sable fin, on voit le sable s'agiter vivement dans toutes les parties de la colonne d'air, excepté en certains points qui sont les *nœuds fixes* de vibration ; dans ces derniers points, la vitesse de l'air est donc nulle. — Avec un peu d'attention, on constate d'ailleurs que les nœuds sont à égale distance les uns des autres, et que la distance de l'extrémité ouverte au premier nœud est égale à la moitié de celle qui sépare deux nœuds consécutifs.

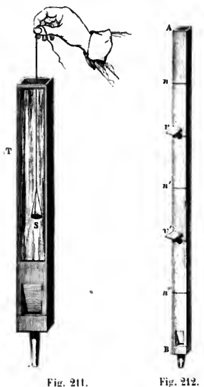


Fig. 211. Fig. 212.

Pour constater l'existence des ventres fixes, prenons, par exemple, un tuyau de bois ouvert (*fig.* 212) ; supposons qu'après avoir déterminé la position des nœuds *n*, *n'*, *n''*, qui correspondent à un son déterminé rendu par ce tuyau, on ait pratiqué, dans l'une de ses faces et à égale distance de deux nœuds consécutifs, de petites ouvertures *v*, *v'*, qu'on puisse à volonté ouvrir ou fermer à l'aide de petites plaques de bois mobiles. Si, pendant que le tuyau rend le son dont il s'agit, on vient à découvrir l'une de ces ouvertures, ou toutes deux à la fois, on constate que le son ne change pas. Or ce résultat ne peut se concevoir que si les tranches d'air situées au voisinage des ouvertures n'éprouvent ni condensation, ni dilatation, c'est-à-dire si ce sont des *ventres fixes*. — Si l'on pratique d'ailleurs une ouverture en tout autre point du tuyau, le son est aussitôt modifié. — L'expérience précédente montre en outre,

comme on voit, que les ventres fixes sont situés au milieu des intervalles qui séparent les nœuds consécutifs.

306. **Son fondamental et sons harmoniques d'un tuyau.** — Lorsqu'on monte un tuyau sur une soufflerie, et qu'on augmente graduellement la force du courant d'air, on arrive en général à lui faire rendre une série de sons de plus en plus élevés. Le plus grave de ces sons est le ***son fondamental*** du tuyau : ceux qui suivent sont ses ***harmoniques.***

Quant aux lois qui régissent les nombres de vibrations de ces divers sons, elles sont tout à fait semblables à celles des vibrations longitudinales des verges. — Elles peuvent être établies par la théorie : nous nous contenterons de les énoncer et d'indiquer comment on peut les vérifier par l'expérience.

1° *Loi des longueurs.* — Si l'on compare entre eux des tuyaux de même espèce, c'est-à-dire si l'on opère avec des tuyaux qui soient ***tous ouverts,*** ou ***tous fermés,*** on constate que ***les nombres de vibrations qui correspondent au son fondamental, varient en raison inverse des longueurs.***

Pour vérifier cette loi par l'expérience, on peut disposer sur la soufflerie quatre tuyaux, par exemple quatre tuyaux ouverts, dont les longueurs soient entre elles comme les nombres $1, \frac{4}{5}, \frac{2}{3}, \frac{1}{2}$. En faisant rendre à chacun de ces tuyaux le son fondamental, on constate qu'ils donnent l'accord parfait, c'est-à-dire des notes dont les nombres de vibrations sont entre eux comme les nombres $1, \frac{5}{4}, \frac{3}{2}, 2$.

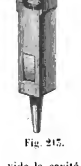


Fig. 213.

On obtiendrait les mêmes vérifications avec quatre tuyaux fermés.

Remarque. — Il faut observer toutefois que si, après avoir pris des tuyaux ouverts, on emploie des tuyaux fermés de même longueur, on obtient des notes, qui sont encore dans les rapports précédents, mais dont chacune est à l'octave grave de la note fournie par le tuyau ouvert correspondant : en d'autres termes, ***le son fondamental d'un tuyau fermé est l'octave grave du son fondamental d'un tuyau ouvert de même longueur.*** — Pour le démontrer, il suffit évidemment de constater qu'un tuyau fermé donne le même son fondamental qu'un tuyau ouvert de longueur double. Or, prenons un tuyau de bois T (*fig.* 213), dont les parois opposées laissent passer une coulisse AS, mi-partie pleine et mi-partie évidée, et placée au milieu de la longueur du tuyau. Si la coulisse est complètement poussée en arrière, de manière que l'ouverture S laisse vide la cavité du tuyau, on a un tuyau ouvert : si la coulisse est poussée

en sens contraire, comme l'indique la figure, de façon que sa partie pleine soit à l'intérieur, on a un tuyau fermé de longueur moitié moindre : or, qu'elle occupe l'une ou l'autre de ces positions, le son fondamental du tuyau demeure le même.

2° *Loi des harmoniques.* — *Les nombres de vibrations des harmoniques successifs d'un même tuyau ouvert varient comme la série des nombres naturels* 1, 2, 3, 4, 5 ... — *Les nombres de vibrations des harmoniques successifs d'un même tuyau fermé varient comme la suite des nombres impairs* 1, 3, 5, 7 ....

Pour vérifier ces deux lois, il suffira de monter sur la soufflerie un tuyau, dont la longueur soit assez grande par rapport aux dimensions de la bouche. En augmentant graduellement la force du courant d'air, on lui fera rendre successivement un certain nombre d'harmoniques, et on déterminera la place de chacun d'eux dans l'échelle musicale; par suite, le nombre de vibrations par seconde de chacun de ces sons. On vérifiera alors que ces nombres successifs sont entre eux dans les rapports indiqués par la loi précédente.

Remarque.— Pour chacun des harmoniques rendus par un même tuyau, la colonne d'air intérieure se partage en un nombre déterminé de parties égales, limitées alternativement par un nœud et par un ventre. Ces points de division sont d'autant plus nombreux que l'harmonique est d'un ordre plus élevé ; mais, dans tous les cas, on constate que le fond d'un tuyau fermé correspond toujours à un nœud. — Au contraire, la bouche, de même que l'extrémité d'un tuyau ouvert, correspond toujours à un ventre. Quant aux nœuds et aux ventres intermédiaires, ils ont des positions variables avec l'ordre de l'harmonique que l'on considère.

307. **Tuyaux à anches.** — Une *anche* est une lame élastique, qui est mise en vibration par le mouvement de l'air, et qui se place d'ordinaire à la partie supérieure d'un tuyau T (*fig.* 214) dans lequel l'air est amené par une soufflerie.

On emploie dans les divers instruments de musique deux espèces d'anches : l'anche *battante* et l'anche *libre*.

Dans l'anche battante (*fig.* 214), la lame métallique ou *languette l* s'applique exactement sur les bords d'une rigole demi-circulaire verticale *r*, laquelle est fermée par une petite cloison horizontale à sa partie inférieure.

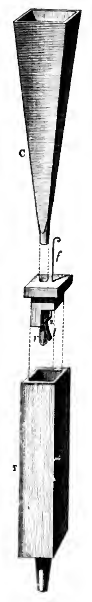


Fig. 214.

L'air qui est amené dans le tuyau T ne peut s'échapper qu'en soulevant la languette *l;* celle-ci revient sur elle-même en vertu de son élasticité, puis se soulève de nouveau, et exécute une série de vibrations, en frappant à chaque fois sur les bords de la rigole. On règle la longueur de la languette, et par suite la hauteur musicale du son, au moyen d'une *razette* formée d'un fil de fer replié, qui s'appuie en *z* sur la lame. — Le timbre des sons rendus par ces anches est ordinairement nasillard : on l'adoucit en adaptant, au-dessus de l'anche, un *cornet d'harmonie* C.



Fig. 215.

L'anche libre (*fig.* 215) diffère de l'anche battante en ce que la languette ne touche pas les bords de l'ouverture par laquelle s'échappe le vent : elle passe librement au travers, et oscille de part et d'autre. Le timbre des sons que ces anches produisent est en général moins strident que celui des anches battantes : cependant on lui donne plus de douceur encore, en adaptant au-dessus de l'anche un cornet d'harmonie C.

LIVRE V. — OPTIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

Propagation de la lumière dans un milieu homogene. — Ombre. -- Pénombre. - Mesure des intensités relatives de deux lumières.
Réflexion. — Lois de la réflexion. — Effets des miroirs plans et des miroirs sphériques, concaves et convexes.

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

308. **Définitions.** — On nomme milieux *transparents* ou *diaphanes* les milieux au travers desquels l'œil peut distinguer les objets lumineux ou éclairés qui y sont placés; tels sont l'air, l'eau, le verre. — On nomme

corps *opaques* les corps au travers desquels l'œil ne peut percevoir en aucune façon la lumière.

309. **Propagation de la lumière dans un milieu homogène.** — Il est facile de constater que, dans un milieu transparent et homogène, la lumière se transmet d'un point à un autre en suivant la *ligne droite* qui joint ces deux points. — En effet, un point lumineux étant placé en un point A, et l'œil en un point B, si l'on dispose un petit écran opaque en un point quelconque de la droite AB, l'œil cesse d'apercevoir le point A. Pour toute autre position de l'écran, ce point lumineux continue d'être visible comme si l'écran n'existait pas.

On appelle *rayon lumineux* la direction rectiligne suivant laquelle la lumière se propage. — Toute ligne droite, menée d'un point quelconque d'un corps lumineux à un autre point de l'espace, représente la direction d'un rayon lumineux.

310. **Ombre. — Pénombre.** — Un corps opaque arrête tous les rayons lumineux qui le rencontrent : il y a donc généralement, derrière un corps opaque, un espace où ne pénètre aucune lumière, et qu'on appelle *ombre portée*. — La détermination des ombres est une question purement géométrique, que nous traiterons seulement dans quelques cas particuliers.

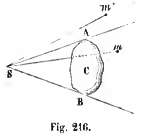


Fig. 216.

Soit une source lumineuse S (*fig.* 216), dont nous supposerons les dimensions réduites à celles d'un *point* géométrique, et un corps opaque C, de forme quelconque. Menons par le point S une droite tangente au corps opaque, et supposons qu'elle se meuve, en passant toujours par S et restant toujours tangente à C, de manière à occuper toutes les positions possibles : elle décrira une surface conique ayant pour sommet S et comprenant C dans son intérieur. Si l'on prend un point quelconque *m* dans l'intérieur de cette surface, le rayon envoyé par S dans la direction S*m* sera intercepté par le corps opaque. Au contraire, un point *m'* situé en dehors de cette surface recevra un rayon lumineux S*m'*. La surface du cône formera la limite entre les points qui sont dans l'ombre portée et ceux qui reçoivent la lumière de la source S.

Supposons maintenant que la source de lumière ait des dimensions sensibles ; nous considérerons seulement le cas particulier où le corps opaque et le corps lumineux sont l'un et l'autre sphériques. — Soit S (*fig.* 217) la sphère lumineuse, O la sphère opaque. Construisons le cône ARB tangent extérieurement aux deux sphères : un point quelconque *m*, situé dans ce cône et derrière la sphère opaque, ne peut recevoir aucun rayon lumineux : ce cône limite donc l'ombre portée ; la

circonférence *abc*, suivant laquelle il touche la sphère O, limite, sur la sphère elle-même, la région qui est complétement dans l'ombre. — Si maintenant on considère les points situés en dehors du cône ARB, on peut se demander si tous ceux qui sont à égale distance de S sont également éclairés. Construisons le cône A'TB' tangent intérieurement aux deux sphères, et considérons deux points *m'*, *m''*, également distants de S, mais situés, l'un dans l'intervalle des deux cônes, l'autre en dehors du cône A'TB'. Si, du point *m''* comme sommet, on décrit un cône *pm''n* qui touche la sphère S suivant une circonférence *rst*, on voit que le point *m''* reçoit de la lumière de tous les points de la zone sphérique située en avant de cette circonférence; quant à cette zone, elle aurait toujours la même grandeur, quelle que fût la position du point *m''*, pourvu qu'il restât à la même distance de S, et en dehors du cône A'TB'. Au contraire, la même construction, faite en prenant le point *m'* pour sommet, fournit sur la sphère S une zone dont la lumière n'arrive qu'en partie au point *m'*, parce que la sphère opaque intercepte une portion des rayons lumineux, portion d'autant plus considérable que *m'* est plus rapproché de la surface du cône ARB. On voit donc que l'espace compris entre les deux cônes ARB, A'TB' est moins éclairé que l'espace extérieur, et la lumière reçue par des points également distants de S va en diminuant à mesure qu'on s'approche de la limite de l'ombre portée. — C'est cet espace qui reçoit le nom de *pénombre*. Le cercle de contact *a'b'c'* limite, sur la sphère opaque elle-même, la région de la pénombre : la partie qui est en avant de ce cercle est seule en pleine lumière.

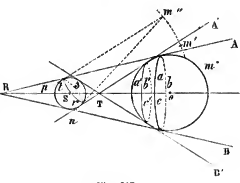


Fig. 217.

311. **Vitesse de la lumière.** — La vitesse de la lumière a été d'abord mesurée à l'aide de phénomènes qui se produisent à de grandes distances de nous, comme les éclipses des planètes, dont l'astronomie permet de calculer les époques précises. En comparant ces époques calculées à celles qui sont fournies par l'observation, on obtient le temps employé par la lumière pour arriver de ces astres jusqu'à nous : par suite, si l'on connaît la distance qui nous en sépare, on en déduit l'espace parcouru par la lumière en une seconde. — Cette méthode, appli-

quée par l'astronome danois Rœmer, a donné, pour vitesse de la propagation de la lumière, environ 77 000 lieues par seconde.

Plus récemment, M. Foucault a pu, à l'aide d'une méthode particulière, effectuer une nouvelle détermination de la vitesse de la lumière, en opérant sur des distances de quelques mètres : cette méthode, d'une extrême précision, a donné comme résultat 298 000 kilomètres par seconde. C'est un nombre sensiblement plus petit que celui de Rœmer.

MESURE DES INTENSITÉS RELATIVES DES LUMIÈRES.

312. **Définition des rapports d'intensité de deux sources lumineuses.** — On dit que deux sources de lumière ont des *intensités égales* lorsqu'elles éclairent également une même surface, placée à la même distance : par exemple, à 1 mètre.

Une source a une intensité *double*, *triple* d'une autre, lorsqu'elle produit le même éclairement que deux, trois sources égales à celle-ci, agissant simultanément et dans les mêmes conditions.

313. **Les quantités de lumière reçues normalement par une même surface, à différentes distances d'une même source, sont en raison inverse des carrés des distances.** — Ce principe, identique à celui qui a été donné précédemment pour la chaleur rayonnante, se démontre théoriquement de la même manière (168).

Il est facile de le vérifier par l'expérience, en constatant que, si une surface déterminée reçoit une certaine quantité de lumière, d'une source placée à une distance de 1 mètre, et si on vient à transporter cette même surface à 2 mètres, il faut, pour produire le même éclairement, quatre sources égales à la première.

314. **Mesure des intensités relatives de deux lumières, ou photométrie.** — On donne le nom de *photomètres* aux instruments qui sont destinés à mesurer les intensités relatives des lumières.

Le principe de la plupart de ces instruments consiste à placer les lumières, dont on veut comparer les intensités I et I', de telle manière qu'elles envoient, sur des surfaces égales, placées à des distances convenables D et D', des quantités égales de lumière. Ce résultat une fois atteint, et I pouvant être considéré comme représentant la quantité de lumière que la surface recevrait de la première source à l'unité de distance, on voit que la quantité de lumière reçue par la même surface à la distance D sera représentée par $\frac{I}{D^2}$; de même, la quantité de lumière reçue de la seconde source à la distance D', et par la même surface,

sera $\frac{I'}{D'^2}$; et, comme ces quantités sont égales dans l'expérience actuelle, on a

$$\frac{I}{D^2} = \frac{I'}{D'^2}, \quad \text{d'où l'on tire} \quad \frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2},$$

c'est-à-dire que le rapport des intensités des deux sources est égal au rapport des carrés des distances.

315. **Photomètre de Bouguer.** — Les conditions que nous venons d'indiquer peuvent être facilement réalisées au moyen du photomètre de Bouguer (*fig.* 218) : deux petites fenêtres *f, f'*, garnies de pa-

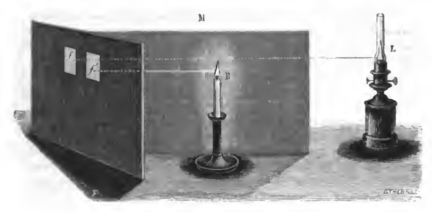


Fig. 218.

pier ou de verre dépoli, sont placées à côté l'une de l'autre; une cloison opaque M, perpendiculaire à celle dans laquelle sont pratiquées les fenêtres, permet de disposer de part et d'autre les deux sources lumineuses, de façon que chaque fenêtre ne soit éclairée que par l'une d'elles. On approche ou on éloigne l'une des deux sources, jusqu'à ce que l'éclairement paraisse le même en *f* et en *f'*, et on mesure alors les distances D et D' de chaque source à la fenêtre correspondante. Le rapport des intensités $\frac{I'}{I}$ est égal à $\frac{D^2}{D'^2}$ (314).

316. **Photomètre de Rumford.** — Le photomètre de Rumford (*fig.* 219) est fondé sur le même principe. On dispose les deux sources de lumière de manière à obtenir, sur un écran blanc E, deux ombres d'une tige verticale A placée devant cet écran : de ces deux ombres, l'une *f*, portée par la source B, ne reçoit de lumière que de la source L; l'autre *f'*, portée par la source L, ne reçoit de lumière que de la source B.

Donc, si l'on fait en sorte que les deux ombres paraissent identiques, et

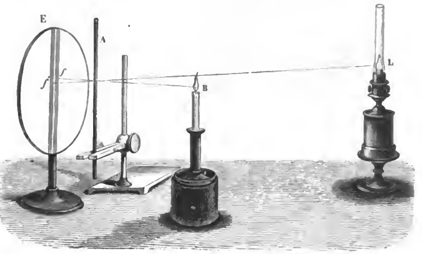


Fig. 219.

si l'on mesure la distance D, de L à f, et la distance D', de B à f', on aura encore $\frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2}$ (314).

RÉFLEXION. — EFFETS DES MIROIRS.

317. **Lois de la réflexion.** — Lorsqu'on reçoit un faisceau lumineux sur une surface bien polie, on observe qu'il est, en grande partie, renvoyé en avant de la surface ou *réfléchi*. — On appelle *plan d'incidence* d'un rayon lumineux AB tombant sur une surface réfléchissante MN (*fig.* 220), le plan déterminé par ce rayon et par la normale BP menée au point d'incidence ; *angle d'incidence*, l'angle ABP formé par le rayon incident et la normale; *angle de réflexion*, l'angle CBP formé par le rayon réfléchi et la normale.

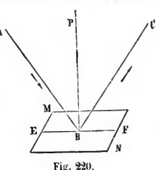


Fig. 220.

Les lois de la réflexion sont les suivantes :

1° *Le rayon réfléchi reste dans le plan d'incidence;*

2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

L'appareil de M. Silbermann (*fig.* 221) permet de vérifier ces lois. — Un miroir métallique A est fixé au centre d'un cercle vertical gradué MN : le plan de ce miroir est perpendiculaire au diamètre vertical BB′ du cercle. L'appareil étant placé dans une chambre obscure, on laisse pénétrer dans cette chambre un faisceau très-fin de rayons solaires, que l'on dirige au moyen du petit miroir *m*, de manière qu'il passe à travers une petite ouverture pratiquée au centre de la pièce *i*, et vienne tomber exactement au centre du cercle *c*. Ce faisceau est réfléchi par le miroir A, et l'on constate alors que, en plaçant la pièce *i′* dans une position exactement symétrique de *i* par rapport au diamètre BB′, on voit le faisceau réfléchi sortir par une ouverture pratiquée au centre de *i′*. — Or le plan d'incidence est ici le plan mené par le point d'incidence *c* parallèlement au cercle gradué, donc *le rayon réfléchi est resté dans le plan d'incidence ;* de plus, *l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence*, puisque les pièces *i* et *i′* sont symétriquement placées par rapport à la normale, qui est parallèle à BB′.

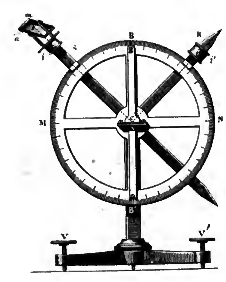


Fig. 221.

MIROIRS PLANS.

318. **Images fournies par un miroir plan.** — Soit un point lumineux A (*fig.* 222) placé devant une surface plane réfléchissante : pour nous rendre compte de la marche des rayons émis par ce point, concevons un plan mené par A perpendiculairement au miroir, et prenons ce plan pour plan de la figure : soit MN la section de la surface du miroir par ce plan, et AB un rayon lumineux qui y soit contenu. Le rayon réfléchi BC sera également dans le plan de la figure, puisque ce plan contient la normale BP menée au point d'incidence, et il fera avec BO un angle PBC

égal à PBA. Or, abaissons du point A sur le plan du miroir une perpendiculaire AI, et prolongeons-la jusqu'à la rencontre en A′ avec le prolongement du rayon réfléchi ; il est facile de démontrer que A et A′ sont placés symétriquement par rapport au miroir : en effet, les deux triangles AIB, A′IB ont le côté IB commun, les angles AIB et A′IB égaux comme droits, et les angles IBA et IBA′ égaux, puisque le premier est le complément de l'angle d'incidence, et que le second est égal au complément de l'angle de réflexion : donc les deux triangles sont égaux; on a AI = A′I, et le point A′ est symétrique de A par rapport au miroir. — Le rayon AB étant quelconque, il résulte de la démonstration précédente que, si l'on considère des rayons incidents quelconques, AB′, AB″,... émanés de A, les prolongements de tous les rayons réfléchis passent par le point A′. — Dès lors, si l'œil est placé de manière à recevoir un certain nombre des rayons réfléchis BC, B′C′, B″C″..., tous ces rayons lui sembleront émanés du point A′, qui prend alors le nom d'*image* du point A.

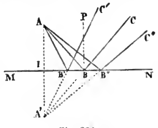


Fig. 222.

En appliquant cette construction aux divers points d'un objet linéaire AD (*fig.* 223) placé devant un miroir plan, on obtient une image A′D′ de cet objet, égale à AD et symétriquement placée par rapport au miroir.

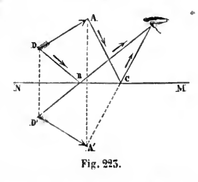


Fig. 223.

319. **Images multiples, fournies par des miroirs parallèles ou inclinés.** — Lorsqu'un objet lumineux ou éclairé est placé dans l'intervalle de deux miroirs plans parallèles, l'œil aperçoit une infinité d'images, derrière chacun des miroirs. — Si les deux miroirs font entre eux un certain angle, contenu, par exemple, un nombre entier de fois dans quatre angles droits, l'œil aperçoit un nombre d'images limité, qui dépend de l'angle formé par les miroirs.

La construction de ces images est une question toute géométrique : elle n'offre aucune difficulté, si l'on remarque que tous les rayons lumineux émanés d'un point A (*fig.* 222) et réfléchis sur un miroir MN, se comportent, après réflexion, comme s'ils émanaient du point A′ : si donc quelques-uns de ces rayons tombent sur un second miroir, ils donneront une seconde image qui sera symétrique de A′, par rapport à ce second mi-

roir : si, parmi les rayons réfléchis, il en est qui tombent de nouveau sur le premier, ils donneront une troisième image, symétrique de la seconde, par rapport à ce dernier miroir, et ainsi de suite. — En effectuant la construction pour le cas où deux miroirs font entre eux un angle contenu *n* fois dans quatre angles droits, on trouve qu'un objet lumineux, placé entre eux, donne lieu à *n*—1 images; l'œil placé dans l'angle des miroirs aperçoit donc en tout *n* fois cet objet.

La formation des images dans le *kaléidoscope* est fondée sur ces principes. — L'instrument se compose de deux petits miroirs, faisant entre eux un angle de 60 degrés, et fixés à l'intérieur d'un tube de carton, de façon que leur arête d'intersection soit appliquée sur l'une des arêtes du cylindre. De petits morceaux de verre colorés sont placés à l'une des extrémités du tube, entre des lames de verre qui les laissent facilement glisser dans diverses positions. On place l'œil à l'autre extrémité du tube, et l'on aperçoit, six fois répétée, la figure formée par les fragments de verre colorés.

MIROIRS SPHÉRIQUES.

320. **Miroirs sphériques en général. — Définitions.** — On nomme *miroirs sphériques*, ceux dont la surface réfléchissante peut être considérée comme faisant partie d'une sphère. — Ils sont dits *concaves* ou *convexes*, selon que la face réfléchissante est la face intérieure ou extérieure de la sphère.

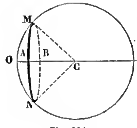


Fig. 224.

Le plus ordinairement, le bord MANB du miroir est circulaire (*fig.* 224); c'est un petit cercle de la sphère dont le miroir fait partie : on le désigne sous le nom de *base* du miroir. — On appelle *axe principal* la perpendiculaire CO, menée du centre C de la sphère sur le plan de la base. — Le *sommet* du miroir est le point O, où cette perpendiculaire vient rencontrer la surface réfléchissante.

MIROIRS SPHÉRIQUES CONCAVES.

321. **Foyer principal.** — Lorsqu'on place un miroir sphérique concave de manière que son axe principal soit dirigé vers le soleil, l'expérience montre que tous les rayons solaires incidents sont réfléchis de manière à aller passer sensiblement par un même point, situé sur l'axe principal lui-même, et qu'on nomme *foyer principal :* si l'on place en ce

point un petit écran de papier, on obtient un éclairement très-intense dans une étendue très-petite de l'écran.

La théorie permet de se rendre facilement compte de ce résultat. — A cause de l'éloignement du soleil, tous les rayons incidents peuvent être considérés comme sensiblement parallèles à l'axe principal. Or, soit MON (*fig.* 225) la section du miroir par un plan mené suivant l'axe principal, et RI un rayon parallèle à l'axe et situé dans ce plan. Ce rayon se réfléchit en I, comme il le ferait sur le plan tangent à la sphère en ce point, et, si l'on remarque que le rayon CI de la sphère est normal au plan tangent en I, on voit que le rayon réfléchi doit rester dans le plan de la figure, et faire avec CI un angle CIF égal à l'angle d'incidence CIR. Soit F le point où ce rayon vient rencontrer l'axe principal : le triangle IFC est isocèle, puisque l'angle ICF, égal à l'angle d'incidence comme alterne-interne, est égal par cela même à l'angle de réflexion CIF; donc FC = FI. D'ailleurs, si l'on suppose, comme nous le ferons toujours, que le miroir soit une très-petite portion de la sphère, et que, par suite, la distance du rayon lumineux à l'axe soit toujours très-petite par rapport aux distances FO et CO, l'angle CFI sera très-peu différent de deux droits, et l'on aura sensiblement IC = IF + FC, ou, en remplaçant IC par OC, et IF par FC,

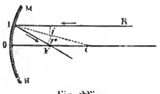


Fig. 225.

$$OC = FC \times 2.$$

Le point F, où le rayon réfléchi rencontre l'axe principal, est donc à égale distance du centre et du sommet du miroir. — Ce résultat étant indépendant de la position particulière du rayon RI, on voit que ***tous les rayons parallèles à l'axe principal du miroir doivent concourir en un même point, situé sur l'axe principal, et à égale distance du centre et du sommet :*** ce point est le ***foyer principal.***

Il est clair que, réciproquement, si un point lumineux placé au foyer principal émet des rayons sur le miroir, tous ces rayons doivent être réfléchis parallèlement à l'axe. — C'est ce que l'expérience confirme immédiatement, et c'est le fait que nous avions admis plus haut à propos de l'expérience des miroirs conjugués (171).

322. **Foyer d'un point situé sur l'axe principal.** — Lorsqu'on place une source lumineuse, de dimensions assez petites pour qu'on puisse la considérer comme se réduisant sensiblement à un point lumineux, sur l'axe principal d'un miroir sphérique concave, et au delà du centre, on constate que les rayons réfléchis par le miroir viennent converger sensiblement en un même point de l'axe. — Ce résultat peut s'expliquer par la théorie, et l'on démontre, en employant une méthode analogue à celle

que nous avons donnée pour le foyer principal (321), que le point où un rayon réfléchi IP′ (*fig.* 226) vient rencontrer l'axe principal est indépendant de la direction particulière PI du rayon incident, et ne dépend que de la position du point lumineux P sur l'axe principal : de là résulte que tous les rayons émanés d'un même point P doivent, après réflexion, passer par le même point P′.

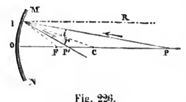


Fig. 226.

Il est aisé de voir que, si le point P est au delà du centre C, comme nous l'avons supposé, le point P′ doit être placé entre le centre et le foyer principal F : en effet, si le miroir recevait en I un rayon parallèle à l'axe, ce rayon se réfléchirait suivant IF; or, l'angle d'incidence actuel PIC étant plus petit que l'angle d'incidence RIC, l'angle de réflexion CIP′ doit être plus petit que l'angle de réflexion CIF, et, par suite, le rayon lumineux IP′ doit être compris dans l'angle CIF.

Réciproquement, un point lumineux étant placé en P′, les rayons lumineux émis par ce point et réfléchis par le miroir vont passer par le point P. — On voit donc que les points P et P′ ont des positions ***réciproques***. On leur donne le nom de ***foyers conjugués***.

La figure 226 montre immédiatement que, si le point lumineux P s'approche du miroir et tend vers le point C, son foyer conjugué s'éloigne du miroir et tend vers le même point C.

Si le point lumineux arrive au centre, son foyer conjugué est au même point, c'est-à-dire que les rayons lumineux réfléchis reprennent, en sens inverse, la direction des rayons incidents, résultat qu'on pouvait d'ailleurs prévoir.

Si le point lumineux, situé maintenant entre le centre et le foyer principal, s'approche du foyer, son foyer conjugué s'éloigne du centre en sens contraire.

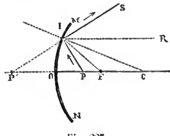


Fig. 227.

Si le point lumineux est placé exactement au foyer principal F, les rayons réfléchis sont renvoyés parallèlement à l'axe, et leur point de concours peut être considéré comme situé à l'infini.

Reste enfin le cas où le point lumineux est placé sur l'axe principal, entre le foyer principal et le miroir lui-même. — Si l'on considère alors un rayon incident quelconque PI (*fig.* 227), on voit que, si le miroir recevait en I un rayon FI émané du foyer princi-

pal F, ce rayon serait réfléchi parallèlement à l'axe, suivant IR : donc le rayon réfléchi actuel IS, qui doit s'écarter davantage de la normale CI, ne peut rencontrer l'axe en avant du miroir; mais le prolongement géométrique IP′ de ce rayon doit venir couper l'axe en P′, derrière la surface réfléchissante. — Une démonstration simple et analogue aux précédentes montre que, ici encore, la position du point P′ est la même pour tous les rayons émanés d'un même point P. — Le point P′ n'étant que la rencontre des *prolongements géométriques* des rayons lumineux, il est clair qu'on ne peut songer à constater ici aucune concentration de lumière sur un écran qui serait situé en ce point. Mais, si l'œil est placé dans le faisceau des rayons réfléchis, il perçoit ces divers rayons comme s'ils émanaient du point P′, c'est-à-dire qu'il *voit* un point lumineux en P′. — Ce point P′ prend alors le nom de *foyer virtuel* du point P.

323. **Images des objets.** — Nous supposerons maintenant qu'on place devant un miroir sphérique concave, non plus un simple point lumineux, mais un objet ayant des dimensions finies. — Parmi les points de cet objet, il y en aura un au plus qui sera sur l'axe principal du miroir, les autres seront à une certaine distance de l'axe : pour construire l'image de l'objet tout entier, il suffira évidemment de savoir construire l'image d'un point pris d'une manière quelconque, en dehors de l'axe principal, et c'est cette question qui va maintenant nous occuper.

Soit un objet AB (*fig.* 228), situé, par exemple, au delà du centre du miroir, et proposons-nous de trouver l'image de l'un des points A de cet objet. Joignons A au centre C du miroir : la direction AC est ce qu'on nomme l'*axe secondaire* du point A. Or il est clair que les rayons émanés de A se comportent, par rapport à cet axe secondaire, comme les rayons émanés du point P (*fig.* 226) par rapport à l'axe principal, c'est-à-dire que tous les rayons partis du point A, et réfléchis sur le miroir, doivent passer, après réflexion, par un point de cette droite, qui est le foyer conjugué de A. — Cela posé, pour déterminer géométriquement ce foyer, il suffit de construire un seul rayon réfléchi; nous choisirons, par exemple, le rayon AI qui émane du point A parallèlement à l'axe : ce rayon vient, après réflexion, passer par le foyer principal F; donc le point A′, où la direction IF vient rencontrer l'axe secondaire AC, est le foyer conjugué de A.

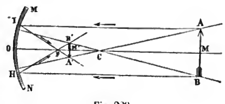


Fig. 228.

On construira de même le foyer conjugué des divers points de l'objet

AB. — Dans la figure ci-contre, la construction a été reproduite pour le point B, et on vérifiera facilement que les points situés sur la droite AB ont leurs foyers placés sur la droite A′B′, qui est *renversée* par rapport à AB.

Dès lors, si l'on prend, par exemple, comme objet lumineux la flamme d'une bougie P (*fig.* 229), et si l'on place un petit écran au foyer conjugué P′,

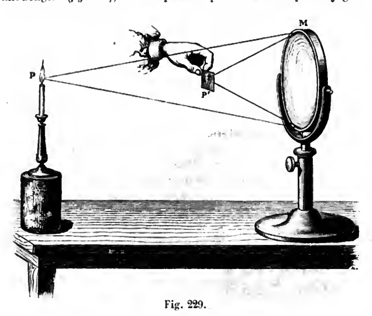


Fig. 229.

les points de cet écran où viendront se rencontrer les faisceaux lumineux émanés des divers points de la flamme seront vivement éclairés, et, diffusant la lumière dans toutes les directions, ils rendront visible l'image renversée de la flamme. C'est ce qu'on nomme une image *réelle*.

Si l'objet est situé, comme nous l'avons supposé, au delà du centre du miroir, l'image est plus petite que l'objet : cela résulte de ce que, dans les triangles semblables ACB, A′CB′ (*fig.* 228), on a $\frac{A'B'}{AB} = \frac{CM'}{CM}$, et, comme le point M′ est plus rapproché du centre que M, A′B′ est plus petit que AB.

Si l'on suppose que l'objet AB se rapproche du centre, la construction montre immédiatement que l'image A′B′ s'en rapproche également, et que sa grandeur augmente.

Si l'objet est placé dans le plan mené par le centre du miroir, perpendiculairement à l'axe principal, l'image, toujours réelle et renversée, devient égale à l'objet.

Si l'objet est placé entre le centre et le foyer, l'image passe au delà du centre; elle est encore réelle et devient plus grande que l'objet.

Toutes ces conclusions de la théorie se vérifient immédiatement, en faisant varier les conditions de l'expérience qui est représentée par la figure 229.

Enfin, si l'objet lumineux est situé entre le foyer principal et le miroir (*fig* 230), le rayon AI, mené du point A parallèlement à l'axe principal, ne rencontre plus l'axe secondaire AC en avant du miroir : mais les prolongements géométriques de ces deux directions se rencontrent derrière le miroir en un point A′, qui est le foyer *virtuel* de A. — On déterminera de même le foyer virtuel du point B, et l'on obtiendra définitivement une image A′B′ de AB, qui sera droite, plus grande que l'objet, et virtuelle. — Une pareille image ne peut évidemment venir se peindre sur un écran, mais un observateur, placé devant le miroir et recevant dans l'œil les rayons réfléchis, perçoit ces rayons comme s'ils émanaient de l'image A′B′.

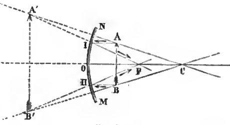


Fig. 230.

MIROIRS SPHÉRIQUES CONVEXES.

324. Foyers virtuels des points placés sur l'axe principal. — Lorsqu'on oriente un miroir sphérique convexe de manière que son axe principal soit dirigé vers le soleil, l'expérience montre que tous les rayons solaires tombant parallèlement à l'axe, forment, après réflexion, un cône *divergent*, dont le sommet serait derrière le miroir. Ce sommet est ce qu'on peut appeler le *foyer principal virtuel* du miroir. — De même, en quelque point de l'axe principal qu'on place un point lumineux, on n'obtient pas de foyer réel en avant du miroir, mais les rayons réfléchis forment encore un cône divergent, dont le sommet, placé derrière le miroir, est le *foyer virtuel* du point lumineux. — Ces foyers ne peuvent évidemment être constatés par la formation d'une image lumineuse sur un écran; mais un observateur, placé devant le miroir, perçoit les rayons réfléchis comme s'ils émanaient de ces foyers eux-mêmes.

Ces résultats de l'expérience peuvent facilement être interprétés par la théorie. — Soit MON (*fig.* 231) la section d'un miroir sphérique convexe par un plan passant par l'axe principal. Considérons un rayon lumineux RI, parallèle à l'axe et situé dans ce plan : il se réfléchit suivant IS, dans

le plan de la figure, et en faisant un angle de réflexion SIN' égal à l'angle d'incidence RIN'. Or, le rayon réfléchi ne peut évidemment rencontrer l'axe principal en avant du miroir, mais son prolongement géométrique rencontre le prolongement géométrique de l'axe en un point F situé derrière le miroir. — Un raisonnement absolument semblable à celui qui a été fait pour les miroirs concaves (321) montrera d'ailleurs que le point F est à égale distance du centre et du sommet du miroir. Tous les rayons incidents parallèles à l'axe seront donc réfléchis de façon que leurs prolongements géométriques passent par le point F, qui est le *foyer principal virtuel* du miroir.

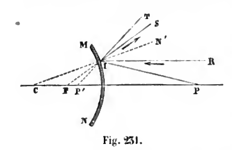


Fig. 231.

De même, en considérant un rayon PI, qui part d'un point P situé sur l'axe principal, on verra que le rayon réfléchi IT doit s'écarter de l'axe principal encore plus que le rayon IS; et l'on démontrera que son prolongement géométrique rencontre le prolongement de l'axe principal en un point P'', dont la position ne dépend que de celle de P. Donc tous les rayons émanés de P seront réfléchis comme s'ils émanaient du point P'', *foyer virtuel* du point P. Le point P'' est évidemment placé entre le foyer principal F et le sommet du miroir.

325. **Images virtuelles des objets.** — Si l'on place devant un miroir sphérique convexe, non plus un simple point lumineux, mais un objet, il suffira, pour déterminer complétement l'image de cet objet, de savoir construire l'image d'un point situé d'une manière quelconque. — Si l'on considère, par exemple, un point A d'un objet AB (*fig* 232), et qu'on mène l'axe secondaire AC, il suffit, pour obtenir le point de concours des rayons émis par A et réfléchis sur le miroir, de déterminer le point de rencontre de AC avec l'un quelconque de ces rayons. Nous prendrons, par exemple, le rayon AI parallèle à l'axe principal, lequel se réfléchit de manière que son prolongement géométrique aille passer par le foyer principal virtuel F; il rencontre le prolongement de AC en un point A', qui est le foyer virtuel de A. — On construira de

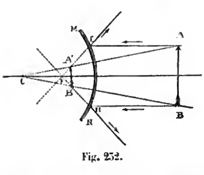


Fig. 232.

même le foyer virtuel B′ de B; tous les points de AB auront leurs foyers virtuels situés sensiblement sur A′B′.

On voit donc que, dans un miroir sphérique convexe, l'image est toujours droite, plus petite que l'objet, et virtuelle.

CHAPITRE II.

Réfraction. — Lois de la réfraction. — Effets des lentilles concaves et convexes. Action des primes. — Décomposition et recomposition de la lumière.

RÉFRACTION. — SES LOIS.

326. **Définitions.** — On donne le nom de *réfraction* à la déviation que subissent les rayons lumineux lorsque, rencontrant obliquement la surface de séparation de deux milieux transparents, ils passent du premier milieu dans le second.

Quand la déviation a pour effet de rapprocher le rayon réfracté de la normale, on dit que le second milieu est *plus réfringent* que le premier. — Quand la déviation a pour effet d'éloigner le rayon lumineux de la normale, on dit que le second milieu est *moins réfringent* que le premier.

On nomme *plan d'incidence* le plan déterminé par le rayon incident et par la normale menée au point d'incidence. — L'*angle d'incidence* est l'angle formé par le rayon incident et la normale; l'*angle de réfraction* est l'angle formé par le rayon réfléchi et la normale.

327. **Lois de la réfraction.** — La réfraction est soumise aux deux lois suivantes, connues sous le nom de lois de Descartes :

1° *Le rayon réfracté reste dans le plan d'incidence.* — 2° *Le rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction est constant pour les mêmes milieux,* quelle que soit la valeur de l'angle d'incidence.

Pour vérifier ces lois par l'expérience, on fixe sur l'appareil de M. Silbermann (*fig.* 221), au lieu du petit miroir A, une auge cylindrique limitée par des plans de verre (*fig.* 233) : cette auge étant fixée en B, on verse de l'eau jusqu'à la hauteur du centre du cercle. Au moyen du petit miroir *m*, on fait arriver un faisceau lumineux qui, passant par une ouverture très-petite pratiquée en *i*, tombe sur la surface de l'eau au centre même du cercle. On fait alors mouvoir la pièce CR, de manière que le faisceau réfracté vienne passer exactement par une petite ouverture pratiquée en *i′*. — C'est ce à quoi on parvient facilement, constate ainsi que le rayon réfracté est situé dans [illegible] qui est parallèle au plan du cercle.

Pour vérifier la seconde loi, on [illegible] le long du support vertical de [illegible] l'extrémité inférieure S′ de la [illegible]

comptée sur cette règle, entre S′ et le diamètre vertical BB′, mesure le sinus de l'angle d'incidence. On amène ensuite cette même règle en contact avec l'extrémité R de la tige qui porte l'ouverture *i*, et l'on a de même la mesure du sinus de l'angle de réfraction. L'expérience montre que le rapport de ces deux sinus est sensiblement $\frac{4}{3}$. — Si maintenant on effectue des déterminations semblables en faisant varier l'angle d'incidence, on trouve toujours le nombre $\frac{4}{3}$ pour rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction.

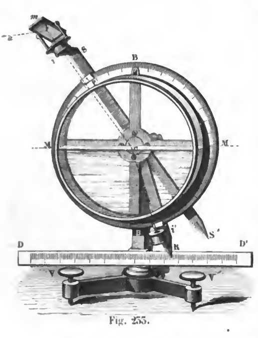


Fig. 255.

328. **Indice de réfraction.** — On appelle *indice de réfraction* d'une substance, par rapport à une autre, le rapport constant qui existe entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction d'un rayon lumineux passant de la seconde dans la première. Ainsi, si l'on désigne par *n* cet indice de réfraction, par *i* l'angle d'incidence, et par *r* l'angle de réfraction, on a

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

D'après l'expérience qui précède, l'indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air est $\frac{4}{3}$. — On trouverait, d'une manière analogue, que l'indice de réfraction du verre par rapport à l'air est $\frac{3}{4}$, et ainsi de suite.

l'on répète ces mêmes expériences en faisant en sorte que la lu-
de l'air dans l'eau ou dans le verre, mais *du vide*
des nombres qui diffèrent très-peu
indices de réfraction de l'eau ou
réfraction absolus. — Dans la
ciable, prendre pour indices

de réfraction absolus des corps solides ou liquides, les indices de réfraction de ces corps par rapport à l'air : c'est ce que nous ferons dans tout ce qui va suivre.

On a, pour déterminer les indices de réfraction, des méthodes d'une très-grande précision, dans la description desquelles nous ne pouvons entrer. Elles fournissent, entre autres, les résultats suivants :

INDICES DE RÉFRACTION DE QUELQUES SUBSTANCES.

Eau.	1,333
. . . .	1,358
. . . .	1,363
…n-glass).	1,529
…l, flint-glass). . .	1,635
. . . .	1,678
. . . .	2,480

Lorsqu…
mière passe, non plus
dans ces mêmes milieux, on trouve
des précédents, et qu'on peut appeler
du verre par rapport au vide, ou *indices de*
plupart des cas, on peut, sans erreur appré…

3… …**averse des rayons.** — Quand un
ray… …de verre à
fac… …nt les deux
fac… …ême milieu
hom… …ple, l'expé-
rie… …mergent I'B
est… …u rayon inci-
den… …érimental, on
peu… …lice de réfrac-
tio… …l'air, l'indice
de… …apport au verre

Fig. 234.

est… …les normales aux deux surfaces, en I et I' : on a,
en… passage de l'air dans le verre :

$$n = \frac{\sin AIN}{\sin PII'}.$$

En …sidérant maintenant le passage du verre dans l'air, on voit que l'angle d'incidence II'N' est égal à PII', puisque ces angles sont alternes-internes ; et que l'angle de réfraction BI'P' est égal à AIN, puisque ces angles ont leurs côtés parallèles deux à deux et dirigés en sens contraire. Donc on a

$$\frac{\sin II'N'}{\sin BI'P'} = \frac{1}{n}.$$

Dès lors, si un rayon lumineux incident SI (*fig.* 235), passant de l'air dans un milieu plus réfringent, tel que le verre, se réfracte suivant IR, réciproquement un rayon lumineux qui suivrait dans le verre la route RI prendrait, en passant dans l'air, la direction IS. — Ce principe, qui ré-

sulte de l'expérience et dont on fait continuellement usage, peut être désigné sous le nom de principe du ***retour inverse*** des rayons lumineux.

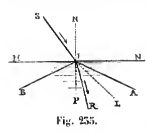


Fig. 235.

330. Angle limite. — Réflexion totale. — Quel que soit l'angle d'incidence d'un rayon lumineux qui se présente pour passer de l'air dans un milieu plus réfringent, l'expérience montre qu'il pénètre dans ce milieu, et la loi de Descartes permet de déterminer la direction du rayon réfracté. Par exemple, SI (*fig.* 235) étant un rayon qui se présente pour passer de l'air dans l'eau, si l'on désigne par i l'angle d'incidence, il est aisé de voir qu'on pourra toujours mener, dans le plan d'incidence, une droite IR telle qu'on ait $\frac{\sin i}{\sin \mathrm{PIR}} = \frac{4}{3}$, c'est-à-dire

$$\sin \mathrm{PIR} = \frac{3}{4} \sin i.$$

En effet, $\sin i$ étant plus petit que l'unité, et multiplié par la fraction $\frac{3}{4}$, le second membre est toujours plus petit que l'unité : il existe donc toujours un angle PIR dont le sinus satisfait à cette condition. — Si maintenant on considère en particulier un rayon incident MI, qui rase la surface du liquide, il fournit, en pénétrant dans l'eau en I, un rayon réfracté IL déterminé par la condition $\frac{\sin 90^\circ}{\sin \mathrm{PIL}} = \frac{4}{3}$, ou bien $\frac{1}{\sin \mathrm{PIL}} = \frac{4}{3}$, ou enfin

$$\sin \mathrm{PIL} = \frac{3}{4}.$$

Cet angle PIL, le plus grand que puissent faire avec la normale les rayons qui pénètrent de l'air dans l'eau, prend le nom d'***angle limite***. — Pour une substance quelconque, on voit qu'il est toujours tel que ***son sinus soit égal à l'inverse de l'indice de réfraction***.

Or, considérons maintenant des rayons lumineux qui se présentent pour passer de l'eau dans l'air. — D'après le principe du ***retour inverse*** des rayons (329), un rayon incident IR sortira de l'eau suivant IS ; un rayon incident LI sortira de l'eau en rasant la surface suivant IM. Mais si un rayon incident AI se présente en faisant avec la normale un angle AIP, plus grand que l'angle limite, ce rayon ne pourra sortir dans l'air : l'expérience montre que, dans ce cas, ***il se réfléchit***, c'est-à-dire qu'il prend, dans l'eau, une direction IB telle que ***l'angle de réflexion*** BIP ***soit égal à l'angle d'incidence*** AIP. — C'est là le phénomène connu sous le nom de ***réflexion totale***.

331. Applications des principes de la réfraction. — Dé-

placement apparent des objets vus dans l'eau. — Au fond d'un vase à parois opaques, on place une pièce de monnaie, et l'on dispose l'œil de façon qu'il aperçoive la pièce à moitié cachée par le bord : dès qu'on verse de l'eau dans le vase, la pièce devient visible tout entière, et paraît relevée, ainsi que le fond du vase qui la supporte. — Dans cette expérience, en effet, ce ne sont pas des rayons tels que *m*O (*fig.* 236), venant en ligne droite de la pièce de monnaie, qui impressionnent l'œil : ce sont des rayons tels que *mi*, qui ont éprouvé en *i* une réfraction les écartant de la normale, et qui arrivent à l'œil suivant *i*O : c'est donc en un point du prolongement de O*i* que l'œil voit la pièce. Si les rayons émergents qui arrivent à l'œil ne sont pas trop inclinés sur la surface du liquide, ce point est précisément celui où la ligne O*i* rencontre la perpendiculaire menée du point *m* à la surface du liquide.

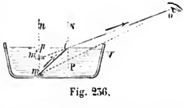


Fig. 236.

C'est pour la même raison qu'un bâton *mn* (*fig.* 237), plongé dans l'eau, paraît brisé, et que la partie immergée semble relevée vers la surface. — L'œil voit la partie extérieure *np* dans sa position véritable ; il voit l'extrémité *m* en *m'*; et tous les points immergés, entre *m'* et *p*.

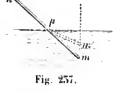


Fig. 237.

332. **Réfractions atmosphériques.** — Les rayons lumineux qui nous arrivent des astres, en traversant des couches de notre atmosphère dont la densité va en croissant progressivement, éprouvent une série de réfractions, qui tendent à les rapprocher de la normale à la surface de chacune de ces couches, c'est-à-dire de la verticale. Donc, notre œil voyant l'astre dans la direction du dernier rayon lumineux qui lui parvient, c'est-à-dire plus près du zénith qu'il n'est réellement, il est indispensable, pour obtenir la position vraie d'une étoile, de faire subir à l'observation une correction qui tienne compte de cette cause d'erreur. (Voir la *Cosmographie*, 12.)

333. **Mirage.** — On donne le nom de *mirage* à des apparences trompeuses, observées fréquemment dans les pays chauds lorsque le temps est calme, et qui font apparaître les objets lointains renversés, comme s'ils étaient réfléchis par une nappe d'eau. Ce phénomène a été expliqué par Monge, lors de l'expédition de la république française en Égypte.

Le sol, échauffé par le soleil, porte à une température très-élevée les couches d'air qui sont en contact avec lui : celles-ci échauffent lentement à leur tour les couches qui sont au-dessus d'elles, et, si le temps est calme, il peut se former, jusqu'à une certaine hauteur, des couches su-

perposées dont les densités vont en décroissant à mesure qu'on s'élève. Supposons que l'œil d'un observateur soit en O (*fig.* 238), et soit P le

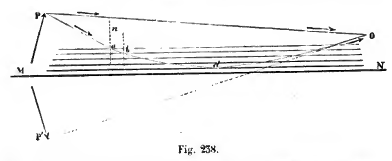


Fig. 238.

sommet d'un objet élevé. Parmi les rayons que P envoie vers le sol, on peut concevoir qu'un rayon P*a*, passant successivement d'une couche dans une autre moins dense, se réfracte en s'éloignant toujours de la normale, et tombe enfin en *d*, à la surface de séparation des deux couches de densités différentes, sous un angle plus grand que l'angle limite, de façon à subir la réflexion totale : à partir de ce point il se relève de plus en plus, et peut revenir vers l'œil de l'observateur. Celui-ci aperçoit alors une image du point P, sur le prolongement du rayon qui lui arrive, en P'.

EFFETS DES LENTILLES.

334. **Définitions**. — Nous n'avons à nous occuper que des lentilles sphériques. On distingue dans ces lentilles six variétés, savoir :

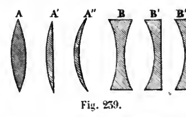


Fig. 239.

1° Les lentilles *biconvexes*, telles que A (*fig.* 239), terminées par deux surfaces sphériques convexes [1];

2° Les lentilles *plan-convexes*, telles que A', terminées par une surface sphérique convexe et par une surface plane;

3° Les lentilles *concaves-convexes à bords minces*, telles que A'', terminées par deux surfaces sphériques, l'une concave et d'un rayon plus grand, l'autre convexe et d'un rayon moindre;

4° Les lentilles *biconcaves*, telles que B, terminées par deux surfaces sphériques concaves;

[1] Les six figures précédentes représentent les sections de ces diverses espèces de lentilles. Pour les lentilles A, A'', B, B'', le plan de la section est mené par la ligne des centres; pour les lentilles A' et B', ce plan est conduit suivant la perpendiculaire abaissée du centre de la surface sphérique sur la surface plane.

5° Les lentilles *plan-concaves*, telles que B′, terminées par une surface sphérique concave et par une surface plane;

6° Les lentilles *concaves-convexes à bords épais*, telles que B″, terminées par deux surfaces sphériques, l'une concave et d'un rayon moindre, l'autre convexe et d'un rayon plus grand.

On nomme *axe principal* d'une lentille la droite qui joint les centres des deux faces, si ces faces sont toutes deux sphériques : ou la droite menée du centre de la surface sphérique perpendiculairement à la surface plane, s'il s'agit d'une lentille plan-concave ou plan-convexe.

Les trois premières variétés A, A′, A″, dont l'épaisseur va en diminuant vers les bords, ont la propriété de ramener vers leur axe principal les rayons qui les rencontrent : on les comprend sous le nom de lentilles *convergentes.*

Les trois autres variétés, B, B′, B″, dont l'épaisseur va en augmentant, vers les bords, ont, au contraire, la propriété d'écarter de leur axe les rayons qui les rencontrent : on leur donne le nom de lentilles *divergentes.*

LENTILLES CONVERGENTES.

335. **Foyer principal d'une lentille convergente.** — Lorsqu'on oriente une lentille convergente de façon que son axe principal soit dirigé vers le soleil, l'expérience montre que les rayons solaires, tombant sur la lentille dans des directions qui sont parallèles à son axe principal, sont réfractés de manière à venir passer tous sensiblement par un même point de l'axe principal. — Ce point est le *foyer principal* de la lentille.

Si l'on considère en particulier une lentille biconvexe, il est facile de concevoir qu'elle doive, en effet, ramener les rayons vers son axe principal. Un rayon incident RI (*fig.* 240) doit, en passant de l'air dans le verre, se réfracter en se rapprochant de la normale menée au point d'incidence, laquelle n'est autre chose que le rayon de courbure OI. En arrivant en I′, ce rayon subit une nouvelle réfraction, et s'écarte de la normale en I′, qui n'est autre que le rayon de courbure O′I′. Ces deux réfractions successives ont pour effet, l'une et l'autre, de ramener le rayon lumineux vers l'axe principal de la lentille, et, comme le rayon incident était parallèle à l'axe, le rayon réfracté viendra nécessairement

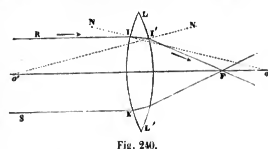


Fig. 240.

rencontrer ce même axe en un certain point F. — Pour compléter cette explication, il nous resterait à démontrer qu'un autre rayon incident quelconque SK, parallèle à l'axe, doit venir, après réfraction, passer par le même point K. Nous ne donnerons pas cette démonstration, et nous nous contenterons d'avoir constaté le fait par expérience.

Réciproquement, lorsqu'un point lumineux est placé au foyer principal F d'une lentille convergente, tous les rayons émanés de ce point et tombant sur la lentille sont réfléchis dans une direction parallèle à l'axe principal.

556. **Foyer d'un point situé sur l'axe principal.** — Plaçons, sur l'axe principal d'une lentille convergente, une source de lumière assez petite pour pouvoir la considérer comme se réduisant sensiblement à un point lumineux; puis, avec un écran placé de l'autre côté de la lentille, cherchons le point vers lequel la lentille concentre la lumière. — Nous constaterons les faits suivants:

1° Si le point lumineux est placé, sur l'axe principal, à une distance très-grande de la lentille, les rayons réfractés viennent se rencontrer en un point placé très-près du foyer principal. — D'ailleurs, les positions de P et de P′ (*fig.* 241) sont réciproques l'une de l'autre, c'est-à-dire que, comme pour les miroirs, P′ est, par rapport à P, un foyer *conjugué*.

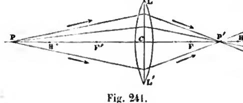


Fig. 241.

2° Si l'on rapproche progressivement le point lumineux P (*fig.* 241), son foyer P′ s'éloigne, et, quand le point lumineux arrive en H′, à une distance de la lentille double de la distance du foyer principal son foyer arrive en H, à la même distance de la lentille.

3° Si le point lumineux est entre H′ et F′, le foyer conjugué est au delà de H. — Quand le point lumineux arrive en F′, les rayons réfractés sont, comme nous l'avons dit, parallèles à l'axe principal.

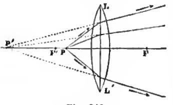


Fig. 242.

4° Enfin, si le point lumineux P est placé, sur l'axe principal, entre le foyer principal F′ et la lentille (*fig.* 242), les rayons réfractés ne peuvent plus rencontrer l'axe principal à droite de la lentille, et ils restent encore divergents les uns par rapport aux autres. Dans ce cas, leurs directions, prolongées du même côté de la lentille que le point lumineux, vont rencontrer la direction de l'axe principal

en un point P′, situé plus loin que P, mais d'autant plus voisin de la lentille que P en est lui-même plus rapproché. — Le foyer du point P est donc, dans ce cas, un foyer *virtuel*.

337. **Images des objets. — Centre optique, axes secondaires.** — Si l'on place devant une lentille convergente, et à une distance plus grande que la distance focale principale, non plus un simple point lumineux, mais un objet ayant des dimensions finies, l'expérience montre qu'on peut recevoir, sur un écran placé de l'autre côté de la lentille et à une distance convenable, une image réelle et renversée de cet objet. — L'expérience se fait facilement avec la flamme d'une bougie (*fig.* 243).

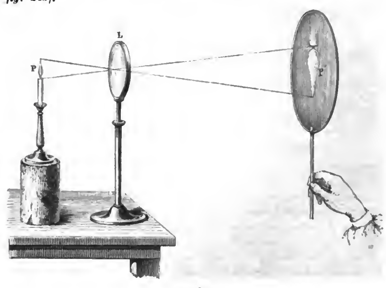


Fig. 243.

Cette expérience prouve que les points placés sur l'axe principal ne sont pas les seuls dont les rayons viennent, après réfraction, former un foyer au delà de la lentille, mais que chacun des points de la flamme situé hors de l'axe principal a son foyer nettement déterminé, en un point situé également hors de l'axe principal.

Fig. 244.

Pour construire géométriquement ces images, dont nous venons de constater l'existence, il suffira de savoir que, dans toute lentille, il existe un point C (*fig.* 244) nommé *centre optique*, tel que *tout rayon qui, en se réfractant, vient pas-*

ser par ce point, sort de la lentille parallèlement à sa direction primitive. Le centre optique est situé à l'intérieur de la lentille, sur l'axe principal; et, quand les courbures des deux surfaces sont les mêmes, il est à égale distance des deux faces de la lentille. — Dès lors, si l'épaisseur de la lentille est assez petite, comme c'est l'ordinaire, on peut en général considérer le rayon émergent KS comme se confondant avec le prolongement IR′ du rayon incident, ce qui conduit à l'énoncé suivant :

Tout rayon lumineux, dont la direction prolongée passe par le centre optique d'une lentille, traverse cette lentille en ligne droite.

1° Cela posé, considérons un objet lumineux AB (*fig.* 245), placé plus loin que le double de la distance focale principale CH′ de la lentille, et proposons-nous de construire l'image de cet objet. — Pour obtenir l'image du point A en particulier, joignons ce point au centre optique C, et prolongeons cette droite au delà de la lentille : la direction AC est ce qu'on nomme l'*axe secondaire* du point A. Un rayon lumineux émané de A, dans la direction AC, poursuit sa route en ligne droite : par suite, pour obtenir le point de concours des rayons qui forment l'image de A, il suffit de trouver la marche d'un second rayon réfracté quelconque, et de déterminer le point où il rencontre l'axe secondaire. Choisissons, par exemple, le rayon AI parallèle à l'axe principal : il vient, après réfraction, passer par le point F, et détermine, par son intersection avec l'axe secondaire, le point A′, qui est le foyer conjugué de A. — On détermine de même le point B′, foyer conjugué de B; tous les points de AB ont leurs foyers conjugués sensiblement sur A′B′.

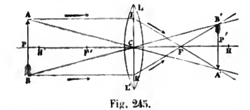


Fig. 245.

Cette construction montre que l'image est *renversée* par rapport à l'objet, puisque les axes secondaires de A et de B se croisent en C. — Elle est *plus petite que l'objet*, puisque, dans les triangles semblables ACB, A′CB′, les lignes AB et AC sont dans le même rapport que CP et CP′, et que, d'après ce que nous avons vu (336, 1° et 2°), CP′ est plus petit que CP.

2° Si l'objet est placé à une distance de la lentille égale au double de la distance focale principale, l'image, toujours réelle et renversée, se forme à la même distance au delà de la lentille, et elle est *égale à l'objet*.

3° Si l'objet est à une distance inférieure au double de la distance focale principale, mais supérieure à la distance focale elle-même, l'image, toujours réelle et renversée, se forme à une distance de la lentille supérieure au double de la distance focale principale, et elle est ***plus grande***

que l'objet. — Si l'objet est au foyer principal, il ne se forme plus d'image.

4° Enfin, si l'objet AB est situé entre le foyer principal F′ et la lentille (*fig.* 246), en effectuant une construction semblable à la précédente, on voit que le rayon AI, parallèle à l'axe, donne un rayon réfracté IF, qui ne peut aller rencontrer l'axe principal AC au delà de la lentille ; mais les prolongements géométriques de ces deux droites se rencontrent en A′. Donc les rayons émanés de A forment, au sortir de la lentille, un faisceau divergent qui, en rencontrant l'œil, paraîtra émané du point virtuel A′. — On trouvera de même l'image virtuelle B′ du point B, et l'on obtiendra définitivement une image A′B′ de AB, qui sera ***droite, plus grande que l'objet***, et ***virtuelle***. — Une pareille image ne peut venir se peindre sur un écran, mais un observateur, placé derrière la lentille et recevant dans l'œil les rayons réfractés, perçoit ces rayons comme s'ils émanaient de l'image amplifiée.

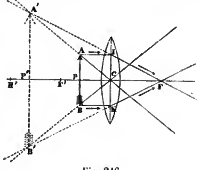


Fig. 246.

LENTILLES DIVERGENTES.

338. **Foyers virtuels.** — Prenons comme exemple des lentilles divergentes une lentille biconcave. Si l'on considère un rayon incident RI parallèle à l'axe (*fig.* 247), il éprouve, en entrant dans la lentille, une première réfraction qui le rapproche de la normale OIN, et suit la direction II′ ; en sortant de la lentille, il éprouve une seconde réfraction qui l'éloigne de la normale O′I′ et prend la direction I′T. On voit donc que ces deux réfractions en I et en I′ ont pour effet, l'une et l'autre, d'écarter le rayon lumineux de l'axe principal. — Donc, des rayons incidents RI, SK, parallèles à l'axe principal, sortent de la lentille en divergeant. L'expérience constate et la théorie démontre que leurs prolongements géométriques vont se rencon-

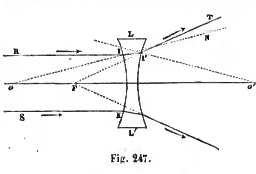


Fig. 247.

trer en un point F, situé sur l'axe principal, et qui est le foyer principal virtuel de la lentille.

A plus forte raison, des rayons émanés d'un point situé sur l'axe principal fournissent-ils des rayons réfractés qui vont en divergeant davantage; leurs prolongements géométriques vont concourir en un point situé sur l'axe, qui est le foyer conjugué virtuel du premier.

339. **Images virtuelles fournies par ces lentilles.** — L'expérience montre qu'une lentille divergente donne toujours une image virtuelle, droite et diminuée d'un objet placé devant elle.

Il est facile de se rendre compte de ce résultat. En effet, tout ce que nous avons dit des axes secondaires, à propos des lentilles convergentes, est applicable sans modification aux lentilles divergentes. Donc, si l'on considère un objet AB (*fig.* 248) placé devant une semblable lentille, pour avoir l'image du point A, on mènera l'axe secondaire AC; puis, le rayon AI parallèle à l'axe, dont le prolongement géométrique devra passer par le foyer principal F, et déterminera le point A′ par sa rencontre avec AC. — On construit de même l'image B′ du point B, et l'examen de la figure montre que l'image A′B′ est toujours *virtuelle, droite* et *plus petite que l'objet.*

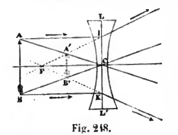


Fig. 248.

ACTION DES PRISMES. — DÉCOMPOSITION ET RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE.

340. **Définitions.** — On désigne, en optique, sous le nom de *prisme*, un milieu diaphane, terminé par deux faces planes faisant entre elles un certain angle.

On nomme *angle réfringent* du prisme l'angle dièdre formé par ses deux faces. — On nomme *arête* du prisme la ligne suivant laquelle se coupent les deux faces.

On comprend sous le nom de *base du prisme* toute la région opposée à l'arête. — Dans les prismes de verre qu'on emploie le plus souvent dans les laboratoires (*fig* 249), la base est limitée par un plan, qui est lui-même parallèle à l'arête. La masse de verre ainsi déterminée présente alors la forme du solide que l'on désigne, en géométrie, sous le nom de prisme triangulaire.

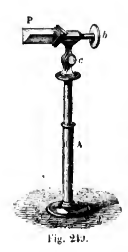


Fig. 249.

On appelle *section principale* d'un prisme, tout plan perpendiculaire à l'arête réfringente : c'est ce qu'on désigne, en géométrie, sous le nom de section droite.

Dans l'étude des propriétés des prismes, nous considérerons uniquement l'action exercée par eux sur des rayons lumineux qui, en arrivant sur la face d'incidence, sont contenus dans une section principale.

341. **Action exercée par un prisme sur un faisceau de lumière parallèle, contenu dans une section principale.** — Lorsqu'on introduit, à travers une ouverture pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, un faisceau de rayons solaires, et qu'on interpose, sur le trajet de ces rayons, un prisme orienté de manière que le faisceau soit dans une section principale, on observe que les rayons émergents ne sont plus dans le prolongement des rayons incidents, mais qu'ils sont déviés vers la base du prisme, tout en restant dans la section principale. En outre, si l'on reçoit le faisceau émergent sur un écran, on n'obtient plus une image blanche et sensiblement circulaire, mais une image allongée dans le sens perpendiculaire à la section principale, et colorée des couleurs de l'arc-en-ciel.

Nous allons rendre compte successivement de ces divers phénomènes : 1° *déviation* du faisceau lumineux ; 2° *dilatation* et *coloration* du faisceau émergent.

342. **Déviation de la lumière par un prisme.** — Soit BAC (*fig* 250) une section d'un prisme. par un plan perpendiculaire à ses arêtes, c'est-à-dire une *section principale*. Soit RI un rayon incident, contenu dans ce plan : si l'on élève au point I la normale NP à la face d'incidence, elle sera contenue dans le plan de la figure, et par suite le rayon pénétrera dans le prisme en restant dans ce même plan, et en se rapprochant de la formule, suivant II'. De même, ce rayon lumineux, arrivé en I', subit une nouvelle réfraction, sans sortir du plan de la section principale ; il s'écarte de la normale P'N', et sort du prisme suivant une direction telle que I'S. — On voit que, dans les conditions indiquées par la figure, les deux réfractions éprouvées en I et I' par le rayon lumineux ont eu pour effet de le ramener vers la base du prisme.

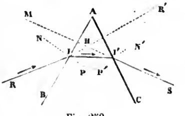


Fig. 250.

Si le rayon incident RI est émis par un objet lumineux ou éclairé, et que l'œil d'un observateur soit placé sur le trajet du rayon émergent I'S, le point lumineux paraîtra, pour cet observateur, situé sur le prolongement de SI', c'est-à-dire en un point de I'M. Donc l'objet lumineux paraîtra reporté vers le sommet du prisme. — C'est ce que confirme l'expérience.

On nomme ***angle de déviation*** l'angle R'HS, que forme le rayon émergent I'S avec le prolongement du rayon incident. — Cet angle varie, non-seulement avec la valeur de l'angle que font entre elles les faces du prisme et avec la nature de la substance dont il est formé, mais aussi avec l'angle d'incidence. — La théorie et l'expérience s'accordent pour montrer que, pour un même prisme, on obtient une ***déviation minimum*** lorsque l'incidence est telle que la portion du rayon II' qui traverse le prisme fasse le même angle avec les deux faces.

Remarque. — Un rayon lumineux tel que RI (*fig* 250), qui rencontre un prisme formé d'une substance plus réfringente que le milieu dans lequel il s'était propagé, peut toujours pénétrer dans ce prisme (330) ; mais si, arrivé en I', il fait avec la normale à la face AC un angle plus grand que l'angle limite, il éprouve la réflexion totale (330), et revient vers l'intérieur. — On verra facilement qu'un prisme dont l'angle réfringent serait plus grand que le double de l'angle limite ne laisserait émerger de sa seconde face aucun rayon lumineux.

343. **Dilatation et coloration du faisceau émergent. — Décomposition de la lumière.** — La dilatation et la coloration qu'éprouve la lumière blanche, en traversant un prisme, peuvent être constatées de la manière suivante : Un faisceau de lumière solaire étant introduit dans une chambre obscure, de manière à former une image à peu près circulaire sur un écran vertical placé à quelque distance, on place sur le trajet de ce faisceau un prisme, dont nous supposerons les arêtes placées horizontalement, et dans une direction perpendiculaire au faisceau : l'image déviée qui se forme sur l'écran est oblongue et colorée ; elle prend le nom de *spectre solaire*.

La figure 251 représente la marche des rayons lumineux qui forment le spectre. BAC est une section principale du prisme ; RI est le faisceau incident, compris dans le plan de la section principale ; MN est l'intersection de l'écran avec le plan de la figure (cet écran est supposé vertical, et parallèle à l'arête réfringente du prisme) ; S est l'image directe formée par le faisceau sur l'écran, qu'on a supposé rabattu autour de MN ; *ru* est l'image déviée, ou le *spectre :* les couleurs s'y succèdent dans l'ordre suivant, en partant de la partie la plus éloignée de l'arête réfringente :

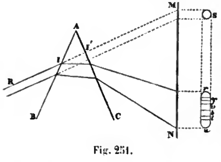


Fig. 251.

Violet, indigo, bleu vert, jaune, orangé, rouge.

344. **Explication de la formation du spectre.** — Pour expliquer la formation du spectre solaire, Newton a admis que la lumière blanche, telle qu'elle nous arrive du soleil, est formée d'une infinité de rayons, de nuances différentes, et pouvant se rapporter aux sept couleurs principales que nous venons d'énoncer. Les rayons de chaque nuance ont une réfrangibilité propre, en sorte qu'ils sont inégalement déviés par le prisme, d'où résulte leur séparation à l'émergence.

Cette explication s'adapte à toutes les particularités de la formation du spectre. — Pour la confirmer, Newton a eu recours à un très-grand nombre d'expériences. Ces expériences démontrent 1° *l'inégale réfrangibilité* des rayons lumineux qui forment la lumière blanche, et qui, séparés par le prisme, donnent naissance au spectre; 2° la possibilité d'effectuer une *recomposition de la lumière blanche*, en réunissant ces rayons de diverses couleurs.

345. **Inégale réfrangibilité des rayons qui forment le spectre.** — Si l'on pratique une petite ouverture dans l'écran MN sur lequel on reçoit le spectre solaire formé par un prisme BAC (*fig.* 252), on

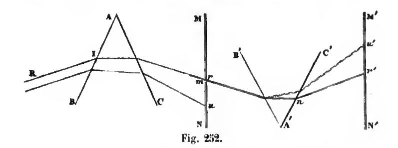


Fig. 252.

peut isoler ainsi un faisceau de rayons appartenant sensiblement à une même nuance de la même couleur, du rouge par exemple. Si l'on fait alors passer ce faisceau rouge au travers d'un nouveau prisme B'A'C', on constate d'abord qu'on n'obtient jamais en *r'*, sur l'écran M'N' placé au delà, aucune autre couleur que la couleur rouge primitive, d'où l'on conclut que chaque nuance du spectre est *simple*, c'est-à-dire qu'elle n'est plus décomposable en couleurs différentes. — En outre, si l'on fait tourner le prisme BAC sur lui-même, de manière à faire passer par l'ouverture *m* des rayons d'une autre couleur, des rayons violets par exemple, on constate que ces rayons éprouvent, en traversant le second prisme, une déviation plus grande que les rayons rouges : l'image, au lieu de se former en *r'*, se forme en *v'* par exemple. — Les rayons des autres couleurs, lorsqu'ils traversent la même ouverture *m*, viennent donner, derrière le second prisme, des images qui occupent des positions intermédiaires entre *r'* et *v'*. — Donc les divers rayons du spectre ont, à travers une

même substance, des réfrangibilités qui vont en croissant, depuis le rouge jusqu'au violet.

On arrive aux mêmes conclusions par l'expérience des *prismes croisés*, due également à Newton. — Un faisceau de rayons solaires, que nous supposerons horizontal, est reçu sur un premier prisme, dont les arêtes sont horizontales et perpendiculaires à la direction du faisceau ; il se forme, sur un écran vertical placé au delà, un spectre vertical. On interpose, entre le prisme et l'écran, un second prisme dont les arêtes sont verticales, de manière à recevoir sur lui les rayons qui émergent du premier : on obtient alors sur l'écran un spectre qui est rejeté horizontalement, du côté de la base du second prisme, et qui, en outre, est incliné à 45° sur l'horizon, si les deux prismes sont formés de la même substance et ont le même angle réfringent. — De ce résultat, on conclut que les rayons de diverses couleurs, isolés par le premier prisme, ont subi, en traversant le second, une déviation dans le sens horizontal ; mais que cette déviation a été inégale pour les rayons de chaque couleur. Les rayons violets sont ceux qui ont été le plus déviés ; les rayons rouges l'ont été le moins.

346. **Recomposition de la lumière blanche.** — En superposant les rayons de diverses couleurs que le prisme a séparés, on reconstitue la lumière blanche. C'est ce que montrent les expériences suivantes.

Un premier prisme BAC (*fig* 253) étant placé, comme il a été dit, sur le trajet d'un faisceau de lumière blanche, au lieu de recevoir le faisceau réfracté sur un écran, où il formerait un spectre, on le fait tomber sur un second prisme A'B'C' identique au premier, et ayant ses faces parallèles à celles du premier, mais dirigées en sens contraire. En recevant les rayons, à leur sortie du second prisme, sur un écran, on obtient une image blanche, présentant seulement quelques irisations sur ses bords. — On conçoit en effet que le second prisme a fait éprouver à chacun des rayons une déviation inverse de celle que lui avait imprimée le premier : il a donc rendu de nouveau parallèles les rayons de diverses couleurs, au moins dans la plus grande partie du faisceau émergent.

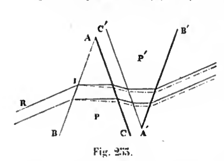


Fig. 253.

De même, lorsqu'on reçoit sur une lentille convergente les rayons réfractés par un prisme, ces rayons sont rendus convergents. En plaçant alors un écran derrière la lentille, on parvient, avec quelques tâtonnements, à trouver une position de l'écran pour laquelle l'image qui s'y forme est absolument blanche : en ce point, il y a superposition de toutes les cou-

leurs. — Au contraire, si l'on déplace un peu l'écran en deçà ou au delà de ce point, on obtient une image dont le milieu seul est blanc, et dont les limites sont colorées; en effet, les rayons de diverses couleurs formant des cônes différents, à cause de leur inégale réfrangibilité, il arrive que les rayons rouges ou les rayons violets débordent, par rapport aux autres rayons, selon qu'on se place d'un côté ou de l'autre de la région où avait lieu leur intersection.

Enfin, pour démontrer autrement encore que la sensation simultanée de toutes les couleurs du spectre produit sur notre œil l'impression de la lumière blanche, on peut avoir recours au *disque de Newton*. — Un disque de carton porte un certain nombre de disques de papier, en forme de secteurs circulaires, collés à côté les uns des autres. C'est d'abord un secteur rouge *r* (*fig.* 254), puis un secteur orangé *o*, un secteur jaune *j*, etc., enfin un secteur violet *u*; puis une seconde série semblable à la première, et ainsi de suite, de manière à couvrir le disque tout entier : les angles au centre des divers secteurs sont sensiblement proportionnels aux étendues des couleurs correspondantes dans le spectre. Or, si l'on fait tourner rapidement ce disque autour de son centre, l'œil ne distingue qu'une teinte uniforme, sensiblement blanche. — Pour se rendre compte de ce résultat, il suffit de remarquer que les impressions lumineuses en général, produites à un moment déterminé sur notre œil, ne s'effacent pas instantanément; l'expérience a démontré qu'elles durent environ un dixième de seconde. De là résulte que, si un point lumineux décrit une circonférence en moins d'un dixième de seconde, l'œil le voit à la fois dans toutes ses positions successives, et la courbe tout entière semble éclairée. Donc, si le disque ne portait qu'un seul secteur, un secteur jaune, par exemple, et que la rotation fût assez rapide, le cercle tout entier paraîtrait coloré en jaune; par suite, avec la disposition actuelle, tous les points du disque doivent paraître colorés à la fois de toutes les couleurs du spectre. L'expérience montre que la simultanéité de ces impressions produit la sensation de la lumière blanche.

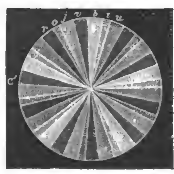


Fig. 254.

347. Couleurs des corps non lumineux. — Les corps qui ne sont pas lumineux par eux-mêmes, et qui, éclairés par le soleil ou les autres sources lumineuses, nous paraissent de différentes couleurs, doivent cette propriété à une véritable décomposition de la lumière. — Si les pétales d'une fleur, éclairés par la lumière solaire, nous paraissent rouges, par exemple, c'est qu'ils absorbent tous les rayons de la lumière

blanche, excepté les rayons rouges, et qu'ils diffusent ces derniers. Un corps jaune ne diffuse que les rayons jaunes, et ainsi de suite. — Les corps blancs, comme le papier, diffusent également les rayons de diverses couleurs. — Les corps noirs sont ceux qui absorbent toutes les couleurs, sans en diffuser aucune.

348. **Rayons calorifiques et rayons chimiques.** — Lorsqu'on produit un spectre en employant un prisme de sel gemme, substance qui laisse passer la chaleur aussi bien que la lumière, on peut, en plaçant une pile thermo-électrique dans les diverses parties du spectre lumineux, constater une élévation sensible de chaleur. Toutefois, les quantités de chaleur qui parviennent dans les diverses régions sont très-loin d'être égales entre elles. Ainsi, la pile accuse très-peu de chaleur dans la partie violette, un peu plus dans le bleu, plus encore dans le jaune et dans le rouge. Le soleil nous envoie donc des rayons calorifiques doués de réfrangibilités diverses, comme les rayons lumineux, et produisant un spectre calorifique. — Mais, en outre, si l'on continue à explorer l'espace situé dans le prolongement du spectre lumineux, on reconnaît que le spectre calorifique s'étend au delà du rouge, et jusqu'à une distance à peu près égale aux dimensions du spectre lumineux lui-même. On en doit conclure que la lumière solaire contient, outre les rayons visibles qui sont à la fois *calorifiques et lumineux*, des rayons *calorifiques obscurs* doués d'une réfrangibilité moindre que les premiers.

De même, si l'on reçoit le spectre solaire sur quelques-unes de ces substances sur lesquelles la lumière peut effectuer des combinaisons ou des décompositions chimiques, et qui sont en usage par exemple dans la photographie, on constate que les altérations produites sur elles sont très-inégales dans les diverses régions du spectre. A l'inverse des propriétés calorifiques, les propriétés chimiques se manifestent surtout dans les régions les plus réfrangibles, c'est-à-dire dans les points voisins du violet ; elles dépassent aussi, du côté du violet, les limites du spectre visible, en sorte que le soleil nous envoie, outre les rayons qui sont à la fois *chimiques et lumineux*, des rayons *chimiques obscurs*, doués d'une réfrangibilité plus grande que les premiers.

349. **Spectres fournis par les lumières artificielles.** — Les flammes formées par les corps gazeux incandescents, sans aucun corps solide en suspension, sont caractérisées par des spectres *discontinus :* on y observe en général des bandes lumineuses en plus ou moins grand nombre, séparées par de grands espaces obscurs. — Ces bandes lumineuses sont d'ailleurs différentes selon la nature des corps gazeux qui constituent la flamme, et caractéristiques pour chacun d'eux.

Les corps solides ou liquides, à mesure qu'on les échauffe, émettent d'abord des rayons caloriques obscurs, c'est-à-dire les rayons les moins réfrangibles (348). Puis, la température s'élevant davantage, aux rayons

obscurs s'ajoutent des rayons lumineux : ce sont d'abord les rayons rouges, puis les rayons jaunes, et ainsi de suite jusqu'aux rayons violets, qui apparaissent seulement quand le corps arrive à la température *blanche*, c'est-à-dire quand il émet des rayons de toutes les couleurs à la fois. En même temps, apparaissent les rayons chimiques, dans une étendue d'autant plus grande que la température est plus élevée. — Ce qui caractérise essentiellement les spectres des corps solides, c'est qu'ils sont absolument *continus*, et ne présentent aucun de ces espaces obscurs qu'on observait dans les spectres produits par la lumière des corps gazeux.

Les flammes produites par les corps gazeux qui tiennent en suspension des particules solides fournissent également des spectres continus, parce que l'éclat des particules solides incandescentes l'emporte toujours beaucoup sur celui du gaz lui-même. Ainsi, les flammes de nos bougies, de nos lampes, qui doivent leurs propriétés éclairantes aux parcelles de charbon mises en liberté pendant la combustion, donnent toujours des spectres continus, dans lesquels certaines parties ont seulement une intensité prédominante.

L'arc voltaïque, dont nous avons déjà indiqué le mode de production (234), fournit une lumière dont le spectre est caractérisé par des bandes extrêmement brillantes, variables avec la nature des corps qui forment les deux électrodes, et caractéristiques de ces corps. — Cette remarque confirme l'idée que nous avions émise précédemment, à savoir, que l'arc est formé par des particules matérielles, transportées d'un pôle à l'autre, et formant une sorte de conducteur intermédiaire (235).

350. **Analyse spectrale.** — Les différences caractéristiques qui existent entre les spectres produits par les divers corps, quand ils sont à l'état de gaz ou de vapeur, ont conduit à une méthode d'analyse d'une extrême sensibilité, à laquelle MM. Kirchhoff et Bunsen ont donné, dans ces dernières années, des développements inattendus. — En alimentant la flamme du gaz d'éclairage par un courant d'oxygène ou par un courant d'air rapide, de manière à brûler complétement le charbon et à rendre la flamme à peine visible, puis introduisant dans cette flamme des sels de divers métaux en très-petites quantités, ils l'ont vue prendre des couleurs diverses, et former au travers d'un prisme des spectres caractéristiques. C'est ainsi que la présence du sodium dans la flamme est accusée par la présence, dans le spectre, d'une raie jaune très-brillante ; celle du lithium, par une raie rouge et par une raie jaune différente de la raie du sodium ; celle du strontium par des raies rouges et orangées, et par une raie bleue, etc.

Ce procédé d'investigation est d'ailleurs tellement sensible qu'il permet, par exemple, de décéler dans la flamme la présence d'un trois millionième de milligramme de sodium, de neuf millionièmes de milligramme de lithium, etc.

Enfin, l'apparition de raies particulières, n'appartenant à aucun des

métaux déjà connus, a conduit presque immédiatement MM. Kirchhoff et Bünsen à la découverte de deux nouveaux métaux, le cæsium et le rubidium, qui ont ensuite été isolés par eux, au moyen de procédés chimiques. — Bientôt après, un troisième métal, le thallium, signalé en Angleterre par M. Crookes, sur la simple apparition d'une raie verte spéciale, a été isolé en France par M. Lamy.

351. **Raies du spectre solaire.** — Lorsqu'on prend toutes les précautions nécessaires pour obtenir, avec la lumière solaire, un spectre bien pur, on y découvre une multitude de raies obscures transversales, parallèles à l'arête réfringente du prisme. Ces raies, signalées par Wollaston et étudiées ensuite par Fraunhofer, sont souvent désignées par le nom de ce physicien. Plus tard encore, David Brewster en a pu compter jusqu'à deux mille. — Elles ne sont pas uniformément distribuées dans toute l'étendue du spectre, mais réunies en groupes (*fig.* 255), dont les sept principaux, signalés par Fraunhofer, ont été désignés par les

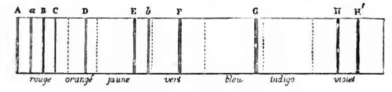


Fig. 255. — Raies du spectre solaire.

lettres B, C, D, E, F, G, H. La figure ci-dessus en indique quelques autres encore, telles que A, *a*, *b*, H', qu'on distingue très-facilement.

La présence de ces raies obscures, dans le spectre de la lumière solaire, est une preuve de discontinuité dans la réfrangibilité des rayons qui composent cette lumière, telle qu'elle nous parvient. Si l'on considère, en effet, les rayons qui forment le rouge extrême du spectre et ceux qui constituent le violet extrême, on voit que la lumière solaire contient un grand nombre de rayons dont les indices de réfraction sont intermédiaires entre le plus petit et le plus grand, puisque la plus grande partie du spectre est éclairée; mais il n'y a pas passage insensible de l'un de ces indices à l'autre : il manque tous les rayons qui devraient avoir un indice convenable pour remplir les places occupées par les espaces obscurs.

Quant à l'explication de cette discontinuité, elle a été donnée par M. Kirchhoff, et nous en indiquerons succinctement le principe. — Si l'on fait passer au travers d'un prisme la lumière d'une lampe à alcool salé, on observe que le spectre se réduit à peu près à la bande jaune qui caractérise le sodium. Supposons maintenant qu'on place, au delà de cette lampe, un corps solide élevé à une très-haute température, comme un bâton de chaux rendu incandescent dans la flamme d'un mélange

d'oxygène et d'hydrogène (lumière de Drummond), de façon que la lumière émise par la chaux doive traverser la flamme d'alcool salé, avant d'arriver au prisme; on voit alors apparaître, au lieu du spectre continu que la chaux aurait produit directement, un spectre dans lequel la place de la bande jaune est occupée par une raie obscure. La flamme de l'alcool salé a donc la propriété d'absorber, dans la lumière qu'elle reçoit, précisément les rayons qui ont la même couleur et la même réfrangibilité que ceux qu'elle émet. — Ces résultats ont été généralisés par M. Kirchhoff : le pouvoir absorbant d'un corps quelconque, à une température déterminée et pour une même espèce de lumière, est toujours proportionnel à son pouvoir émissif. Ce n'est là d'ailleurs, comme on voit, qu'une extension du principe qui était déjà établi pour la chaleur (175).

Cela posé, pour expliquer la production des raies du spectre solaire, M. Kirchhoff admet que le noyau solide ou liquide de l'astre est enveloppé d'une photosphère gazeuse, dont l'éclat propre est notablement inférieur au sien. Sans la présence de cette photosphère, le noyau nous enverrait une lumière qui produirait un spectre continu (349); mais cette lumière, en traversant la photosphère, perd, par absorption, la plus grande partie des rayons dont la réfrangibilité correspond à ceux que la photosphère émet elle-même. En d'autres termes, la photosphère se comporte, par rapport à la lumière émise par le noyau, comme la flamme d'alcool salé par rapport à la lumière émise par la chaux incandescente. — M. Kirchhoff a déterminé, avec le plus grand soin, la position exacte des raies obscures du spectre solaire, pour la comparer à celle des raies brillantes des corps connus : on voit en effet que, si l'on constate une coïncidence exacte, entre certaines raies obscures du spectre solaire et les lignes brillantes fournies par un corps déterminé, on en pourra conclure la présence de ce corps dans la photosphère du soleil. De là, comme on voit, une véritable analyse de l'atmosphère solaire. analyse qui a déjà fourni les résultats les plus remarquables.

CHAPITRE III.

Description des instruments d'optique les plus simples. — Chambre noire. — Loupe. — Microscope. — Lunette astronomique. — Lunette de Galilée. — Télescope de Newton.

INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

352. **Classification des instruments d'optique.** — Les instruments d'optique, destinés en général à modifier les conditions dans lesquelles nous voyons les objets, peuvent être partagés en deux groupes distincts.

Les uns fournissent une *image réelle* des objets, images qu'on reçoit sur un écran : les divers points de l'écran sur lesquels se forment les foyers correspondants aux divers points de l'objet, sont ainsi éclairés

chacun d'une manière particulière; ils diffusent en tous sens la lumière qu'ils reçoivent, et l'image est visible pour des observateurs placés d'une manière quelconque et regardant l'écran. — Parmi les instruments de cette espèce, nous citerons la ***chambre noire***, le ***microscope solaire***, la ***lanterne magique***.

Dans les autres, les rayons lumineux émanés de l'objet, et dont la marche a pu d'ailleurs être modifiée par des réfractions ou des réflexions, sont reçus sur une lentille, au delà de laquelle doit être placé l'œil de l'observateur, et qu'on nomme ***oculaire***. Au sortir de cette lentille, il n'y a plus de foyer réel, mais les rayons émanés d'un même point sont au contraire divergents: l'œil les reçoit comme s'ils venaient d'un point situé en deçà de la lentille; c'est-à-dire que les rayons émanés des divers points de l'objet forment une ***image virtuelle***, qui ne peut être perçue par l'œil que s'il est placé comme nous l'avons supposé. — Parmi les instruments de ce second groupe nous citerons la ***loupe***, le ***microscope composé***, la ***lunette astronomique***, la ***lunette terrestre***, la ***lunette de Galilée***, les ***télescopes***

INSTRUMENTS FORMANT UNE IMAGE RÉELLE SUR UN ÉCRAN.

353. **Chambre noire.** — Nous choisirons, comme type de la chambre noire, celle dont la photographie fait aujourd'hui un si fréquent usage, pour la reproduction des images au moyen des substances impressionnables à la lumière. — Celles dont on faisait autrefois usage pour le dessin sont complétement abandonnées, maintenant que l'on sait fixer les images en quelques secondes.



Fig. 256. — Chambre noire pour la photographie.

La chambre noire des photographes se compose d'une caisse rectangulaire, formée de deux pièces B,E (fig. 256),

qui peuvent glisser l'une dans l'autre : à la face antérieure de la première pièce est fixé un tube T, qui porte un système de lentilles ou *objectif;* dans la face postérieure EE' de la seconde pièce, est enchâssée une glace de verre dépoli, que l'on peut enlever à volonté, et que l'on remplace par les plaques qui ont été préalablement enduites des substances impressionnables.

Pour se rendre compte de la formation des images, il suffit de se souvenir que, lorsqu'un objet lumineux est placé devant une lentille convergente, et à une distance supérieure au double de la distance focale principale, il se forme, au delà de la lentille et à une distance moindre que le double de la distance focale principale, une image réelle, renversée, et plus petite que l'objet (337,1°) — La marche des rayons lumineux qui concourent à la formation de l'image est représentée par la figure 257. Nous supposons l'objectif réduit à une simple lentille convergente LL' :

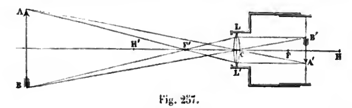


Fig. 257.

AB est l'objet, placé à une distance supérieure au double de la distance focale principale CH' de cette lentille. Pour obtenir le foyer conjugué du point A, nous mènerons l'axe secondaire AC de ce point ; nous considérerons en outre le rayon AF' qui passe au foyer principal F', et qui se réfracte en devenant parallèle à l'axe principal : ce rayon rencontre l'axe secondaire AC au point A', qui est le foyer réel du point A, c'est-à-dire que tous les rayons partis de A, et tombant sur l'objectif, vont, après réfraction, passer par le point A'. — En déterminant de la même manière le foyer B' correspondant au point B, on obtient l'image A'B' de AB. — Cette image vient se peindre nettement sur la glace dépolie qui forme le fond de l'appareil, à la condition que la glace soit placée très-exactement dans le plan qui contient les foyers de tous les points de l'objet.

Pour bien juger de la netteté de l'image, et régler l'appareil avant de commencer l'opération, le photographe a soin d'entourer sa tête, et la partie postérieure de l'appareil, d'une étoffe noire, qui arrête tous les rayons lumineux venant des parties environnantes de l'espace. Sans cette précaution, ces rayons, qui se diffusent sur la face postérieure de la glace dépolie, l'empêcheraient d'apprécier la netteté de l'image elle-même. — Il commence par amener approximativement la glace au point convenable, par les mouvements de la pièce E dans la pièce B (*fig.* 256) ; puis il fixe E dans une position invariable, à l'aide de la vis de pression

qui se trouve en arrière; enfin, il achève de régler l'appareil, en faisant avancer ou reculer un peu l'objectif lui-même, au moyen de la vis Y.

L'appareil une fois réglé, on ferme provisoirement l'objectif au moyen d'un disque métallique qui s'y adapte exactement, et l'on enlève la glace dépolie; on lui substitue une plaque qui a été préparée dans l'obscurité. Cette plaque est apportée dans un châssis parfaitement clos qui s'adapte à la place de la glace dépolie. La face qui est enduite des substances sensibles doit être tournée du côté de l'intérieur, et couverte par une trappe de bois, qui reste baissée jusqu'au moment où l'on commence l'expérience.

Tous ces préliminaires terminés, on découvre d'abord la plaque, du côté intérieur, en levant la trappe qui la couvrait; on enlève également l'obturateur métallique qui fermait l'objectif, et on laisse les rayons lumineux qui forment l'image agir sur les substances sensibles, pendant un temps variable, selon les circonstances. — On remet ensuite l'obturateur, on abaisse la trappe, et l'on emporte la plaque dans son châssis, jusque dans le laboratoire obscur, où doivent s'achever les opérations chimiques qui rendront les parties impressionnées distinctes de celles qui ne l'ont pas été.

354. **Microscope solaire.** — Le microscope solaire est destiné à donner, dans une pièce où l'on produit une obscurité aussi complète que possible, au moyen de volets parfaitement clos, des images réelles et considérablement amplifiées d'objets très-petits. On reçoit ces images sur un écran blanc, placé dans la pièce à une assez grande distance de l'appareil. — Quant au principe de l'appareil lui-même, il n'y a de différence essentielle, entre le microscope solaire et la chambre noire des photographes, que dans la distance de l'objet à l'objectif, qui doit être réglée de manière à donner une image plus grande que l'objet.

L'objectif, que nous supposons réduit à une simple lentille très-con-

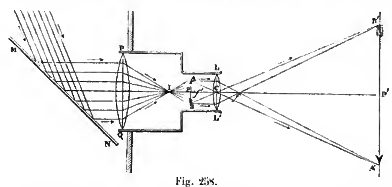


Fig. 258.

vergente LL' (*fig.* 258), est assujetti dans une monture, que l'on fixe à une

ouverture pratiquée dans le volet. L'objet AB est placé à une distance de la lentille *un peu supérieure* à la distance focale principale $f'C$; l'écran qui doit recevoir l'image est placé de façon que l'image s'y forme avec netteté. — Cette image étant très-amplifiée par rapport à l'objet, et n'étant d'ailleurs formée que par les rayons qu'émet l'objet lui-même, il est indispensable d'éclairer très-fortement ce dernier, si l'on veut que l'image ait un éclat suffisant. C'est pourquoi on dispose ordinairement, en dehors de la pièce où se fait l'expérience, un miroir incliné MN, qui renvoie les rayons solaires sur une lentille convergente PQ, laquelle les concentre sur l'objet AB.

Pour construire la marche des rayons lumineux qui forment l'image, on mènera, par l'un des points A de l'objet, l'axe secondaire AC, puis un rayon parallèle à l'axe principal, qui rencontre l'axe secondaire au point A' où se fait l'image de A. — On obtiendra de même l'image B' du point B, et par suite, l'image A'B' de l'objet AB.

Il est facile de déterminer, par une expérience directe, le ***grossissement linéaire*** obtenu dans des conditions déterminées, c'est-à-dire le rapport de deux dimensions linéaires de l'image et de l'objet. — Pour cela, on emploie un ***micromètre***, consistant en une lame de verre, sur laquelle on a tracé des traits équidistants, très-rapprochés : dans les micromètres dont on fait le plus ordinairement usage, la distance de deux traits consécutifs est de un centième de millimètre. On mesure, au moyen d'une règle divisée, la distance qui existe entre les images de deux de ces traits, et on la divise par leur distance réelle : le quotient est le grossissement linéaire. — Le grossissement linéaire une fois obtenu, on en peut déduire le ***grossissement superficiel***, c'est-à-dire le rapport entre la surface de l'image et celle de l'objet. En effet, l'image et l'objet étant des figures semblables, le rapport de leurs surfaces est égal au carré du rapport de leurs dimensions homologues : en d'autres termes, le grossissement superficiel est exprimé par le nombre qu'on obtient, en élevant au carré le nombre qui représente le grossissement linéaire. Ainsi, par exemple, si, dans des circonstances déterminées, le grossissement linéaire est représenté par 100, le grossissement superficiel sera représenté par 10 000.

Enfin, sans faire usage du micromètre, on peut obtenir une valeur approchée du grossissement linéaire, en mesurant simplement la distance de la lentille à l'image. — En effet, si l'on compare deux dimensions homologues A'B' et AB de l'image et de l'objet, on voit que leur rapport $\frac{A'B'}{AB}$, c'est-à-dire le grossissement linéaire, est égal au rapport $\frac{CP'}{CP}$. Or, d'après ce que nous avons dit, la distance CP est très-sensiblement égale à la distance focale principale de l'objectif, distance qui

peut avoir été déterminée une fois pour toutes, et que nous représenterons par f; il vient alors :

$$\text{grossissement} = \frac{CP'}{f};$$

de sorte que, dans chaque cas particulier, il suffit de mesurer CP', pour obtenir une valeur apportée du grossissement linéaire.

355. **Lanterne magique.** — La lanterne magique ne diffère du microscope solaire que par des détails de construction. Son objectif est beaucoup moins convergent, c'est-à-dire que sa distance focale principale est plus grande, et par suite elle fournit, toutes choses égales d'ailleurs, un grossissement beaucoup moindre : c'est ce que montre immédiatement la valeur approchée du grossissement linéaire à laquelle nous venons de parvenir. — Pour cette raison même, il n'est pas nécessaire d'éclairer les objets avec autant d'intensité, et l'on se contente de placer dans la lanterne une lampe placée devant un miroir concave, qui renvoie sur une lentille convergente toute la lumière qu'il reçoit : celle-ci concentre sur l'objet à la fois la lumière qui lui arrive directement de la lampe, et celle qui a été réfléchie par le miroir.

Les objets sont des dessins peints sur verre, ou des images photographiques : on les place, comme dans le microscope solaire, à une distance de l'objectif supérieure à la distance focale principale.

INSTRUMENTS A OCULAIRES, DONNANT DES IMAGES VIRTUELLES.

356 **Loupe.** — La loupe est une simple lentille convergente, qui fonctionne comme *oculaire*, c'est-à-dire qu'on place devant l'œil pour obtenir une image virtuelle et amplifiée des petits objets.

Soit AB (*fig.* 259) un objet placé entre la lentille et son foyer principal F'. Si l'on mène l'axe secondaire AC, et, du même point A, un rayon AI parallèle à l'axe principal, ce rayon, qui vient après réfraction passer par le foyer principal F, ne peut rencontrer AC au delà de la lentille; mais le prolongement géométrique IA' du rayon réfracté rencontre le prolongement de CA en un point A'; ce point A' est un foyer virtuel, c'est-à-dire que tous les rayons émanés de A, ont, en sortant de la lentille, les mêmes directions que s'ils émanaient de A'. On ob-

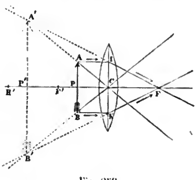


Fig. 259.

tiendra de même le foyer conjugué B′ de B, et par suite l'image virtuelle A′B′ de l'objet AB. — Or, il est aisé de voir que, si l'on rapproche l'objet AB du foyer F′, l'image A′B′ grandit et s'éloigne de la lentille ; cela résulte de la construction que nous venons d'indiquer; si même l'objet arrivait jusqu'au foyer, l'image s'éloignerait jusqu'à l'infini. Donc il est toujours possible de donner à l'objet AB, entre le foyer et la lentille, une position telle que l'image se forme à la ***distance minimum de la vision distincte***, c'est-à-dire à la distance à laquelle nous rapprochons les objets pour en voir le mieux possible les détails à l'œil nu.

Quand cette position de l'objet est réalisée, si l'on suppose que CP′ soit cette distance, et que le centre optique de l'œil soit sensiblement confondu avec celui de la lentille, l'œil aperçoit l'image et l'objet sous le même angle A′CB′ ; cet angle est plus grand que celui sous lequel l'œil nu verrait l'objet, s'il était placé à la même distance CP′, c'est-à-dire à la distance minimum de la vision distincte. — C'est dans ce sens qu'on peut dire que la loupe ***grossit*** les objets : pour un même œil, ce grossissement est d'autant plus grand que la lentille est plus convergente.

On donne quelquefois le nom de ***microscope simple*** à une simple loupe, montée sur un pied, au-dessus d'une plaque sur laquelle on place les objets, et munie d'une vis qui permet de faire varier à volonté la distance du ***porte-objet*** à la loupe : cet instrument est commode, pour les recherches d'histoire naturelle qui exigent un faible grossissement.

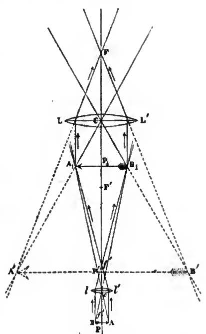


Fig. 260.

357. **Microscope composé.** — Théoriquement, le microscope composé n'est que la réunion du microscope solaire et de la loupe : un objectif, comme celui du microscope solaire, donne une image réelle et amplifiée d'un objet placé à une distance un peu supérieure à sa distance focale principale : une lentille convergente, fonctionnant comme oculaire, regarde cette image ***à la loupe***, c'est-à-dire qu'elle lui substitue, pour l'œil, une image virtuelle située à la distance minimum de la vision distincte.

La figure 260 rend compte de

la marche des rayons et de la formation des images. *ll'* est l'objectif, dont les foyers sont en *f* et *f'*; LL' est l'oculaire, dont les foyers sont en F et F'; AB est l'objet, placé à une distance de l'objectif un peu supérieure à la distance focale principale *f'c*. La figure indique la construction de l'image réelle et amplifiée A_1B_1, qui est donnée par l'objectif, et qui est renversée par rapport à l'objet: cette construction est exactement celle que nous avons employée pour l'image du microscope solaire (354). Les rayons lumineux qui se croisent en chacun des points de cette image continuent leur route, en sorte qu'ils arrivent sur l'oculaire LL' absolument comme s'ils émanaient d'un objet lumineux placé en A_1B_1; l'oculaire étant d'ailleurs situé à une distance de A_1B_1 qui est inférieure à la distance focale principale F'C, les rayons émergents donnent une image virtuelle A'B'. Cette image se construit exactement comme pour la loupe (356); elle est droite par rapport à A_1B_1, et, par suite, renversée par rapport à l'objet. Ici encore, en réglant convenablement la distance de l'objet à l'appareil, on amènera l'image virtuelle A'B' à se former à une distance de l'œil égale à la distance minimum de la vision distincte.

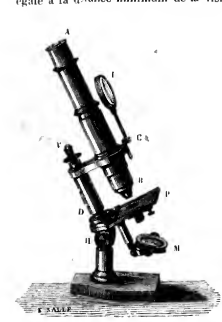


Fig. 261. — Microscope composé.

L'oculaire et l'objectif sont ordinairement assujettis dans un tube métallique AB (*fig.* 261), supporté par un collier C. Les objets, placés entre deux lames de verre minces et transparentes, sont déposés sur la plaque P ou *porte-objet*, au-dessus de l'ouverture circulaire pratiquée en son milieu : lorsqu'ils sont suffisamment transparents, on les éclaire en dessous, au moyen du miroir concave M, sur lequel on reçoit la lumière des nuées ou celle d'une lampe, et qui renvoie cette lumière dans l'ouverture du porte-objet. Lorsqu'on veut examiner des objets opaques, on les éclaire en dessus, au moyen d'une lentille convergente L, que l'on abaisse de manière à concentrer la lumière les objets eux-mêmes. — La vis V, dont les mouvements font er ou descendre le collier C.

permet de rapprocher ou d'éloigner à volonté le tube du porte-objet. jusqu'à ce qu'on obtienne une image nette. — L'objectif est, en général, formé de deux ou trois lentilles très-convergentes, montées dans de petites garnitures métalliques qui s'adaptent les unes aux autres. L'oculaire est formé de deux lentilles convergentes, montées dans un même tube qu'on introduit à la partie supérieure A. On a, pour un même instrument, plusieurs systèmes d'objectifs et d'oculaires, que l'on peut à volonté substituer les uns aux autres, pour obtenir des grossissements variables.

358. **Usages de la chambre claire : détermination du grossissement d'un microscope.** — Le *grossissement linéaire* d'un microscope se mesure par le rapport de deux dimensions homologues de l'image et de l'objet. — La méthode la plus employée pour effectuer cette mesure consiste dans l'usage d'une *chambre claire*, dont on fait encore quelquefois usage pour dessiner les objets placés sous le microscope.

Parmi les chambres claires de diverses formes que l'on peut employer, nous décrirons celle qui est adaptée aujourd'hui aux microscopes par la plupart des constructeurs, et en particulier par M. Nachet. Un petit miroir métallique *mn* (*fig.* 262), percé en son centre d'une petite ouverture circulaire, se fixe au-dessus de l'oculaire L, de façon à être incliné d'environ 45 degrés sur l'axe du tube ; un prisme rectangulaire *abc* est disposé latéralement, de manière que sa face hypoténuse *ac* soit sensiblement parallèle à *mn*. Si l'œil est placé en O, tout près de l'ouverture du miroir, il reçoit, au travers de cette ouverture, les rayons émis par l'objet AB et transmis par le microscope, en sorte qu'il voit l'image virtuelle de cet objet à la distance minimum de la vision distincte. D'autre part, si l'on a disposé latéralement, au-dessous du prisme, une feuille de papier P, les rayons envoyés par une partie de cette feuille, éprouvant la réflexion totale sur la face hypoténuse *ac* et venant se réfléchir de nouveau sur le miroir *mn*, arrivent à l'œil suivant les mêmes directions que les rayons venus de l'objet. L'image virtuelle semble donc se peindre sur la feuille de papier elle-même, et, en suivant les contours avec la pointe d'un crayon, on pourra en dessiner les principaux détails.

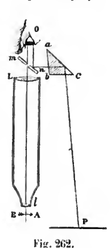


Fig. 262.

Pour mesurer, à l'aide de la chambre claire, le grossissement linéaire d'un microscope, on place sur le porte-objet un micromètre tracé sur verre, comme celui qui nous a servi à mesurer le grossissement du mi-

croscope solaire (354), et l'on dispose sur la feuille de papier une règle divisée en millimètres, de manière que l'image des divisions du micromètre se projette sur les divisions de la règle. Supposons, par exemple, que 3 divisions de la règle soient couvertes par 1 division grossie du micromètre : les divisions du micromètre étant égales chacune à un centième de millimètre, le grossissement linéaire sera exprimé par $\frac{3}{0{,}01} = 300$.

359. **Lunette astronomique.** — La lunette astronomique se compose des mêmes éléments que le microscope composé : un objectif convergent, qui donne une image réelle des objets lumineux ; et un oculaire convergent, fonctionnant comme une loupe, et donnant une image virtuelle : cette image est, comme dans le microscope, renversée par rapport à l'objet. Dans cette lunette, les objets étant toujours placés à une distance de l'instrument que l'on peut regarder comme infinie, l'image réelle vient se faire très-près du foyer principal de l'objectif, et, pour que cette image grossie par l'oculaire ait encore un éclat suffisant, il est nécessaire que l'objectif soit une très-grande lentille, recevant sur sa surface le plus de lumière possible.

Quant à la marche des rayons lumineux et à la construction des images, on les a indiquées sur la figure 263, qui ne diffère pas essen-

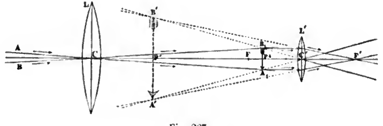


Fig. 263.

tiellement de la figure 260, relative au microscrope composé. L est l'objectif, L' est l'oculaire ; l'objet est supposé à gauche de la figure, et, comme il est très-éloigné, on n'a figuré que les axes secondaires AC et BC, qui passent par les limites de l'objet, dans le plan de la figure : les foyers de ces points sont en des points A_1 et B_1, pris sur les axes secondaires de façon que l'image A_1B_1 soit très-près du foyer principal F de l'objectif. La figure suppose que le foyer de gauche de l'oculaire soit au même point F, ce qui est toujours exact à très peu près, et les rayons émergents donnent une image virtuelle A'B', qui est droite par rapport à l'image A_1 B_1. mais renversée par rapport à

l'objet : cette image a été obtenue, sur la figure actuelle, en reproduisant la construction qui a été indiquée précédemment pour la loupe (356).

L'impossibilité où l'on est de changer la distance de l'objet à l'instrument, comme on le faisait pour le microscope composé, oblige à adopter ici une disposition qui permette de faire mouvoir l'oculaire par rapport à l'objectif, afin d'adapter l'instrument aux différentes vues. L'oculaire est porté dans un petit tube, qui glisse à frottement dans le grand tube qui porte l'objectif: c'est en enfonçant ou en retirant l'oculaire, qu'on arrive à voir l'image se former avec netteté.

Pour mesurer le grossissement linéaire d'une lunette, on peut employer une sorte de chambre claire, imaginée par M. Pouillet, et dont la disposition est analogue à celle qui nous a servi pour le microscope composé (358): on place, à une grande distance de l'instrument, une échelle divisée, dont les lignes de division soient assez grosses pour être vues de loin. La chambre claire superpose les divisions grossies de l'échelle, vues dans la lunette, aux divisions de cette même échelle, vues comme elles le seraient à l'œil nu. On en déduit le grossissement, comme nous l'avons dit plus haut (358).

360. **Réticule de la lunette astronomique. — Fixation de l'axe optique.** — L'un des usages les plus fréquents des lunettes, en astronomie, consiste dans la détermination exacte de la direction dans laquelle se trouve un astre, par rapport à l'observateur, à un moment donné. Pour obtenir ce résultat, on a fixé dans le tube de la lunette, au point même où se forme l'image réelle fournie par l'objectif, un ***réticule***, c'est-à-dire un petit diaphragme circulaire, dans lequel sont tendus deux fils très-fins, perpendiculaires entre eux. On dirige la lunette de manière que l'image du point que l'on vise vienne coïncider exactement avec le croisement des fils du réticule, ou, en d'autres termes, de manière que le croisement des fils paraisse cacher le point lumineux : dans cette position, on sait que le point lumineux est sur le prolongement de la droite menée du point de croisement des fils au centre optique de l'objectif. Cette droite est ce qu'on nomme l'***axe optique*** de la lunette : c'est une ligne dont la direction est déterminée sans aucune ambiguïté. On cherche ordinairement à faire l'axe optique coïncider avec l'axe du tube, mais il n'est pas indispensable que cette condition soit rigoureusement réalisée.

361. **Lunette terrestre.** — On désigne sous le nom de ***lunettes terrestres***, ou de ***longues-vues***, des lunettes qui diffèrent de la lunette astronomique par l'interposition, entre l'objectif et l'oculaire, de deux lentilles convergentes : ces lentilles ont pour effet, non pas de modifier la grandeur de l'image, mais de la redresser, c'est-à-dire de la faire paraître dans la même situation que l'objet.

L'addition de ces deux verres a l'inconvénient de diminuer toujours beaucoup la clarté des images, en ajoutant une nouvelle absorption de lumière, et de nouvelles réflexions sur toutes les surfaces de verre que rencontrent les rayons, à celles que produisent nécessairement l'objectif et l'oculaire. — En outre, avec un même objectif et un même oculaire cette lunette doit toujours avoir une longueur plus grande que la lunette astronomique. — Pour toutes ces raisons, on n'emploie la lunette terrestre, au lieu de la lunette astronomique, que dans les circonstances où le renversement apporte une trop grande gêne dans les observations.

362. **Lunette de Galilée.**— La lunette de Galilée se compose d'un objectif, qui est une lentille convergente, comme dans la lunette astronomique, et d'un oculaire *divergent*, qui est placé sur le trajet des rayons réfractés par l'objectif, avant le point où irait se former l'image réelle. Cette disposition produit, comme nous allons voir, le redressement de l'image.

Soit L (*fig.* 264) l'objectif, AC et BC les axes secondaires, menés par les limites d'un objet trop éloigné pour qu'on puisse en indiquer la position

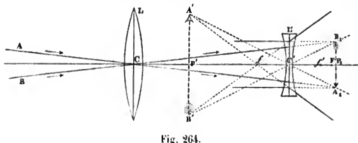


Fig. 264.

sur la figure : les rayons, à leur sortie de l'objectif, convergent vers une image réelle, située un peu au delà du foyer principal de l'objectif que nous supposerons en F; soit donc A_1B_1 l'image réelle et renversée que produirait l'objectif. Soit maintenant L' l'oculaire, lentille divergente placée sur le trajet de ces rayons lumineux, à une distance de A_1B_1 un peu plus grande que sa distance focale principale C'f'. Considérons, parmi les rayons qui tombent sur l'oculaire, celui qui arrive parallèlement à l'axe principal : il est réfracté de manière que son prolongement géométrique passe par le foyer principal virtuel qui est situé en *f*; ce prolongement rencontre le prolongement de l'axe secondaire $C'A_1$ au point **A'**; donc, c'est au point A' que passent les prolongements de tous les rayons qui seraient venus se croiser en A_1 s'il n'y avait pas eu d'oculaire. — On déterminera le point B' par une construction absolument semblable, et

par suite l'image virtuelle toute entière A'B', laquelle est droite par rapport à l'objet.

L'œil doit être placé très-près de l'oculaire, afin de recueillir la plus grande quantité possible des rayons divergents qui lui donneront la sensation de l'image.

L'image ne peut paraître nette que si, pour la vue de chaque observateur, et quelle que soit la distance de l'objet, l'image se forme à la distance à laquelle l'observateur verrait distinctement les objets à l'œil nu. De là, la nécessité de laisser variable la distance de l'oculaire à l'objectif. L'oculaire CD (*fig.* 265) est placé dans un tube PQ, glissant à frottement dans le tube MN qui porte l'objectif AB. L'observateur, en plaçant la lunette devant l'œil, fait avancer ou reculer le tube PQ jusqu'à ce qu'il arrive à une position qui lui donne la netteté maximum : l'instrument est alors *au point*, pour sa vue.



Fig. 265.
Lunette de Galilée.

La lunette de Galilée a l'avantage de n'avoir qu'une longueur très-petite, ce qui la rend beaucoup plus portative que la lunette terrestre. Comme elle, elle redresse les images, et elle a, en outre, l'avantage de laisser passer plus de lumière, puisqu'il n'y a pas de verres interposés entre l'objectif et l'oculaire. Cependant elle a un champ beaucoup moins étendu que la lunette terrestre, en sorte que celle-ci est préférable pour la vision des objets très-éloignés.

Dans la lunette représentée par la figure 265, l'objectif et l'oculaire sont formés chacun de trois lentilles superposées. Cette multiplicité des lentilles est destinée à empêcher les phénomènes de coloration qu'une lentille unique produit toujours sur les bords des images : on dit que le système *achromatise* l'image, ou que les lentilles forment un système *achromatique*.

Les *jumelles* ou *lorgnettes de spectacle* sont formées de deux lunettes de Galilée, assujetties parallèlement, et dont les axes sont à une distance égale à la distance moyenne des pupilles des deux yeux. Les tubes qui portent les oculaires sont disposés de façon qu'ils se meuvent simultanément, de sorte que l'instrument est amené en même temps *au point* pour les deux yeux.

363. **Télescope de Newton.** — On donne en général le nom de *télescopes* à des instruments qui sont destinés, comme les lunettes, à la vision d'objets très-éloignés, mais dans lesquels la lentille objective est remplacée par un miroir; dans le télescope de Newton, ce miroir est un

miroir sphérique concave, qui donne, par réflexion, une image réelle comme celle que donnait l'objectif des lunettes.

Soit MN (*fig.* 266) le miroir sphérique concave, placé au fond d'un tube d'un diamètre égal au sien; C le centre de la sphère dont ce miroir fait partie, O son centre de figure. Soient AC et BC les axes secondaires menés par les points extrêmes d'un objet très-éloigné, placé bien au delà des limites de la figure. Les rayons lumineux qui tombent sur le miroir, parallèlement à son axe principal, et qui sont réfléchis par lui, tendent à produire, un peu au delà de son foyer principal F, une image A_1B_1 laquelle est réelle et renversée par rapport à l'objet. Sur le trajet de ces rayons lumineux, et avant le point où ils iraient former cette image, est placé un petit miroir plan *mn*, incliné de 45 degrés

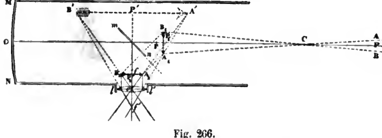


Fig. 266.

sur l'axe du miroir sphérique : les rayons subissent une nouvelle réflexion sur ce petit miroir, et l'image se trouve reportée dans la position A_2 B_2, symétrique de A_1B_1 par rapport à *mn*. Au delà de cette image réelle, et dans la paroi du tube, on place un oculaire *ll'*, formé d'une lentille convergente faisant fonction d'une véritable loupe : son foyer principal est placé en *f*, un peu en deçà de A_2 B_2. Les rayons qui émergent de cette lentille donnent, pour l'œil placé au delà, une image virtuelle A'B'; on règle la distance de cette image à l'œil, en faisant mouvoir l'oculaire, de manière que la perception offre le plus de netteté possible.

Le grossissement donné par ce télescope peut se mesurer directement, à l'aide d'une mire divisée, placée très-loin, et d'une chambre claire analogue à celles que nous avons déjà employées pour le microscope et pour la lunette astronomique.

Le télescope de Newton a été perfectionné dernièrement, dans sa construction, par M. Foucault. — Les miroirs métalliques qu'on employait depuis Newton sont toujours très-pesants : ils sont difficiles à travailler, et offrent en outre l'inconvénient que, l'air humide oxydant

rapidement leur surface, il faut recommencer souvent un travail de polissage qui est extrêmement long et dispendieux. A ces miroirs, M. Foucault a substitué un miroir de verre, dont la surface concave est couverte d'une couche mince d'argent, déposée chimiquement : le premier travail de ces surfaces est plus facile que celui du bronze des miroirs, et M. Foucault a d'ailleurs introduit, dans ce travail lui-même, une précision qui en fait de véritables surfaces mathématiques. Enfin quand la couche mince de métal déposée sur le verre a perdu son brillant, on peut en déposer une nouvelle, et rendre au miroir toutes ses qualités, sans avoir à recommencer le travail de construction de la surface elle-même.

CHIMIE

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

Définitions. — Combinaisons. — Affinité. — Cohésion. — Lois des combinaisons. Équivalents. — Nomenclature. — Cristallisation.

DÉFINITIONS GÉNÉRALES.

1. Phénomènes physiques, phénomènes chimiques. — L'examen de quelques-uns des phénomènes par lesquels les propriétés des corps se manifestent, permet d'établir une distinction simple entre la physique et la chimie.

La fleur de soufre, chauffée dans une cornue de verre, fond dès que la température s'élève ; le solide devient liquide. Si on continue à chauffer, le liquide, d'abord jaune clair, devient de plus en plus brun, puis entre en ébullition et se réduit en vapeur. Ces vapeurs, reçues dans un récipient froid, s'y condensent en une poussière jaune identique à la fleur de soufre employée. Les propriétés du soufre n'ont donc été modifiées que d'une manière *temporaire* dans ce passage à l'état liquide et à l'état de vapeur, l'effet disparaît avec la cause qui le produit; *c'est ce qui caractérise les phénomènes physiques.* — La *fusion*, l'*ébullition* sont donc des phénomènes physiques.

Ce même soufre, chauffé dans un vase ouvert à l'air libre, s'enflamme vers 250°, en répandant une odeur vive et pénétrante. Cette odeur est due à un gaz nouveau résultant de la combinaison du soufre avec un des éléments de l'air, l'oxygène. Ce gaz, même quand il est revenu à la température ordinaire, conserve son odeur suffocante et ses propriétés caractéristiques, qui ne rappellent en rien celles du soufre. L'altération produite est donc ici *profonde*, *essentielle*, elle persiste quand la cause qui l'a fait naître cesse d'agir; *c'est le caractère des phénomènes chimiques.* — La *combustion* est en effet le type des phénomènes chimiques.

Quand on chauffe de la craie dans un four, on constate qu'il se dégage un gaz impropre à la respiration, et qu'il reste un solide, la *chaux*, dont les propriétés sont complètement différentes de celles de la craie. C'est donc là encore un *phénomène chimique*.

Nous sommes ainsi amenés à conclure que, tandis que la physique étudie les phénomènes qui peuvent produire des modifications passagères dans les pro-

priétés des corps sans que leur constitution intime en soit altérée, la chimie s'occupe des phénomènes qui peuvent porter les corps, soit à s'unir, soit à se séparer avec modification *essentielle* et *permanente* dans leurs propriétés.

2. **Corps simples, corps composés.** — Les corps se classent en *corps simples* et en *corps composés*. Les premiers sont ceux dans lesquels les agents chimiques n'ont pu jusqu'ici faire reconnaître qu'une seule espèce de matière; tels sont : le *soufre*, le *fer*, le *cuivre:* ils sont au nombre de 64. Les corps composés, au contraire, sont ceux dont on peut retirer plusieurs substances de nature différente; exemple : l'*eau*, la *craie*, l'*oxyde de mercure*.

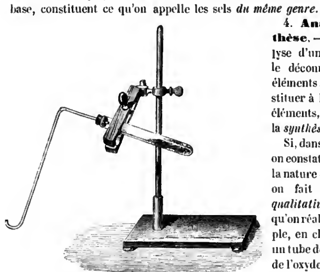
Les composés sont dits *binaires* quand ils contiennent deux corps simples, *ternaires* quand ils en contiennent trois, etc.

3. **Acides, bases, corps neutres, sels.** — Certains composés ressemblent au vinaigre par leurs propriétés chimiques ; on les appelle des *acides;* ceux d'entre eux qui sont solubles dans l'eau ont le goût du vinaigre et rougissent la teinture bleue du tournesol.

D'autres ressemblent à la potasse, qui ramène au bleu cette teinture ougie et neutralise les propriétés des acides; on dit que ce sont des *bases*.

On nomme enfin *neutres* les composés qui ne jouissent ni des propriétés chimiques des acides, ni de celles des bases.

Le produit de la combinaison d'un acide et d'une base s'appelle un *sel*. Tous les sels qui, contenant le même acide, ne diffèrent que par leur base, constituent ce qu'on appelle les sels *du même genre*.


Fig 1. — Décomposition de l'oxyde de mercure.

4. **Analyse, synthèse.** — Faire l'analyse d'un corps, c'est le décomposer en ses éléments; le reconstituer à l'aide de ses éléments, c'est en faire la *synthèse*.

Si, dans une analyse, on constate simplement la nature des éléments, on fait une analyse *qualitative*. C'est ce qu'on réalise, par exemple, en chauffant dans un tube de verre (*fig.* 1) de l'oxyde de mercure : on obtient du *mercure* qui vient tapisser les parois du tube, et de l'*oxygène* qui se dégage à l'état gazeux.

On fait une analyse *quantitative* quand on recherche non plus seulement la nature, mais encore les proportions relatives des éléments ; c'est ce à quoi on arrive, par exemple, en décomposant l'eau par la pile.

L'appareil dont on se sert pour faire cette expérience se compose d'un vase en verre (*fig.* 2), dont le fond est traversé par deux lames de platine. Ce vase étant rempli d'eau acidulée, on recouvre avec de petites éprouvettes graduées et pleines de cette même eau les deux lames de platine, que l'on met en communication avec les pôles d'une pile. Dès que le courant passe, on voit des bulles de gaz se dégager autour des lames et s'élever dans les éprouvettes. On reconnaît bientôt que le gaz qui se dégage autour de la lame négative a *un volume double* de celui qui se produit autour de la lame positive ; ce dernier est de l'*oxygène ;* il rallume une allumette qui présente quelques points en ignition ; l'autre est de l'*hydrogène*, qui brûle au contact de l'air et d'une bougie enflammée.

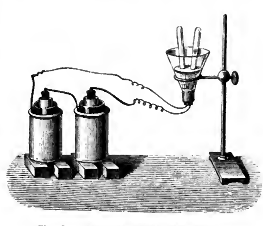


Fig. 2. — Analyse de l'eau par la pile.

Cette expérience fait connaître à la fois la nature et les proportions relatives des éléments qui constituent l'eau.

5. **Corps électro-positifs, corps électro-négatifs.** — La plupart des corps composés peuvent être analysés à l'aide de la pile. On appelle *électro-négatif* celui des éléments qui se porte au pôle positif, et *électro-positif* celui qui se rend au pôle négatif.

Ces dénominations n'indiquent que des propriétés relatives ; ainsi le soufre, électro-positif quand il se combine avec l'oxygène, est électro-négatif quand il s'unit au carbone.

Le plus électro-négatif de tous les corps est l'*oxygène ;* viennent ensuite, d'après Berzelius, par ordre, le *chlore*, le *brôme*, l'*iode*, le *soufre*, le *sélénium*, l'*azote*, le *phosphore*, le *carbone*, le *bore*, le *silicium*, et enfin toute la *nombreuse série des métaux.* Chacun des corps de cette liste est électro-négatif par rapport à ceux qui suivent, et électro-positif par rapport à ceux qui précèdent.

COMBINAISONS. COHÉSION. AFFINITÉ.

6. **Combinaison**. — On dit que deux corps se combinent quand ils s'unissent de manière à en former un troisième, qui diffère par ses propriétés des éléments qui ont servi à le former. Ainsi, l'eau diffère complétement des gaz oxygène et hydrogène qui entrent dans sa constitution (4). L'acide sulfureux ne rappelle ni les propriétés du soufre ni celles de l'oxygène qui le constituent. En effet, tandis que le soufre brûle à l'air, et que l'oxygène rallume une bougie présentant quelques points en ignition, l'acide sulfureux qui résulte de leur combinaison, ne brûle pas, et éteint les corps en combustion ; il n'est ni comburant ni combustible.

Il est facile, d'après cela, d'établir une distinction entre un *mélange* et une combinaison. Dans un *mélange*, les propriétés des éléments se conservent ; dans une *combinaison*, elles sont remplacées par des propriétés nouvelles. On peut, d'ailleurs, dans un mélange, reconnaître et séparer les éléments, soit à l'aide du microscope, soit par des dissolvants appropriés ; dans une combinaison, au contraire, on n'observe qu'un corps homogène dans toutes ses parties.

7. **Phénomènes qui accompagnent les combinaisons.** — Toute combinaison est accompagnée d'un dégagement de chaleur et d'électricité. La chaleur se manifeste souvent avec accompagnement de lumière ; c'est ce qu'on observe dans la combustion du bois, du charbon, du gaz de l'éclairage. Quant à l'électricité, on démontre en physique, que l'électricité des piles est due tout entière à des actions chimiques.

8. **Forces qui interviennent dans les combinaisons.** — Chaque fois que deux corps susceptibles de s'unir se trouvent en présence, deux forces interviennent : l'une qui s'oppose à la combinaison, l'autre qui tend à la déterminer. Ces deux forces sont : la *cohésion* et l'*affinité*. Suivant que l'une ou l'autre l'emporte, il y a ou il n'y a pas combinaison.

9. **Cohésion**. — La cohésion est la force qui tend à maintenir réunies les molécules similaires des corps ; elle est grande dans les solides ; aussi leurs molécules restent unies tant qu'aucune cause extérieure ne vient agir sur elles, et on éprouve, quand on veut les séparer, une résistance souvent très-grande. C'est elle que l'on doit vaincre pour rompre ou pulvériser un corps solide. C'est à elle que les métaux doivent leur dureté, leur ténacité. — La cohésion est beaucoup plus faible dans les liquides ; leurs molécules restent encore unies tant qu'aucune force extérieure n'intervient, mais elles peuvent glisser facilement les unes sur les autres, et on n'éprouve qu'une très-faible résistance quand on cherche

à les séparer. C'est à leur peu de cohésion que les liquides doivent leur fluidité. — Dans les gaz, la cohésion est nulle, les molécules tendent sans cesse à s'écarter les unes des autres.

La cohésion s'oppose évidemment à la combinaison. Diminuer la cohésion de l'un des corps qui se trouvent en présence, c'est favoriser la combinaison. Or, la *chaleur* diminue très-rapidement la cohésion, ainsi que le prouvent les phénomènes de fusion et de vaporisation. Nous ne devrons donc pas être étonnés de voir la chaleur faciliter les combinaisons.

La *dissolution* conduit à un résultat analogue : lorsqu'un solide se dissout dans un liquide, ses molécules se disséminent dans toute la masse de ce liquide : leur cohésion est donc diminuée, et, par suite, la tendance à la combinaison exerce plus facilement son influence. Nous utiliserons très-fréquemment cette propriété pour provoquer des combinaisons chimiques.

10. **Affinité.** — L'affinité est la force qui tend à réunir ou à maintenir réunies les molécules des corps différents : c'est elle qui dans l'eau tient associées les molécules d'oxygène avec celles d'hydrogène. La cohésion s'exerce entre chacune des molécules composées, qui constituent l'eau, et les molécules voisines semblables.

L'affinité entre deux corps est d'autant plus énergique que ceux-ci ont des propriétés chimiques plus différentes : c'est à proprement parler, la force de combinaison. On peut juger de son énergie par le plus ou moins de chaleur et de lumière dont la combinaison est accompagnée. Le soufre et le cuivre, qui jouissent de propriétés très-différentes, doivent avoir beaucoup d'affinité; aussi se combinent-ils avec chaleur et lumière (11). Le cuivre et l'argent, qui se ressemblent par leurs propriétés chimiques, n'ont qu'une faible affinité; aussi peuvent-ils s'unir sans échauffement sensible.

Remarque. — Lorsque deux corps ont une grande affinité l'un pour l'autre, ils forment généralement peu de composés; exemple : le chlore et l'hydrogène, qui se combinent avec chaleur et lumière, ne forment qu'un seul composé, l'acide chlorhydrique. — Deux corps qui ont peu d'affinité forment généralement un grand nombre de composés, ainsi : le chlore et l'oxygène, qu'on ne réussit à combiner que par des moyens détournés, forment cinq composés.

11. **Circonstances qui influent sur l'affinité :**

1° Chaleur. — Chauffer les corps de manière à les amener à l'état liquide, c'est en général favoriser leur combinaison; ainsi, le soufre et le cuivre solides sont sans action, mais si l'on chauffe, dans un ballon de verre (*fig.* 3), 2 parties de cuivre et 1 partie de soufre, ce dernier fond et bientôt la combinaison s'effectue avec incandescence.

Cela ne prouve pas que la chaleur augmente l'affinité. Il suffit d'admettre qu'elle diminue l'affinité moins rapidement que la cohésion.

C'est ce que l'expérience prouve, car dans l'eau la cohésion est déjà détruite à 100°, tandis que l'affinité des éléments n'est pas encore annulée à 1000°. On comprendra donc qu'une chaleur modérée puisse favoriser une combinaison qu'empêcherait une chaleur plus intense. Ainsi : le mercure se combine à 350° avec l'oxygène, pour former de l'oxyde de mercure qui, au rouge sombre, se décompose et reproduit du mercure et de l'oxygène.

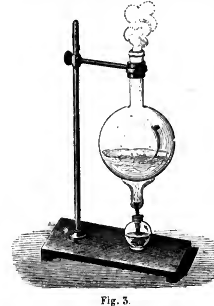


Fig. 3.
Combinaison du soufre et du cuivre.

On a démontré en physique que la compression et le choc dégagent de la chaleur; on ne doit donc pas être étonné de voir ces actions mécaniques produire des combinaisons (oxygène et hydrogène), ou des décompositions (iodure d'azote).

2° Lumière. — La lumière favorise quelquefois l'affinité : le chlore et l'hydrogène, qui n'ont pas d'action l'un sur l'autre dans l'obscurité, se combinent lentement à la lumière diffuse, et instantanément à la lumière solaire. Dans beaucoup de cas, au contraire, la lumière détermine des décompositions : le daguerréotype et la photographie sont fondés sur la propriété que possède la lumière de décomposer certains sels d'argent.

3° Électricité. — L'étincelle électrique peut déterminer la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène, mais une longue série d'étincelles dédouble l'ammoniaque, et le courant de la pile est un des agents les plus puissants de décomposition.

4° Etat naissant. — Au moment où un corps sort d'une combinaison, il est plus apte à se combiner avec un autre corps. C'est ainsi que si l'on met de l'oxyde de mercure dans un flacon plein de chlore, une partie de ce gaz s'emparera du mercure pour former du chlorure de mercure, tandis qu'une autre portion s'unira à l'oxygène naissant pour former de l'acide hypochloreux, qu'on tenterait vainement de produire en mettant en contact du chlore et de l'oxygène libres;

5° Masse. — Si l'on fait passer de la vapeur d'eau sur du fer chauffé au rouge, elle se décompose en oxygène qui s'unit au fer, et en hydrogène qui se dégage. Quand, au contraire, on fait passer de l'hydrogène sur

de l'oxyde de fer chauffé au rouge, l'oxyde est réduit, il se forme de la vapeur d'eau, et le fer est mis en liberté. Berthollet explique ces deux réactions inverses, en admettant que, dans la première, la masse de la vapeur d'eau empêche l'action réductrice de la petite quantité d'hydrogène mise en liberté, tandis que, dans la seconde, la masse d'hydrogène annule l'action oxydante de la petite quantité de vapeur d'eau formée.

M. H. Sainte-Claire Deville a, depuis, démontré que ces phénomènes dépendent de la *vitesse* du courant gazeux : un courant très-lent de gaz acide chlorhydrique ne détermine dans le sesquioxyde de fer qu'une modification moléculaire qui l'amène à l'état cristallin, tandis qu'un courant rapide l'aurait transformé en chlorure de fer et en eau.

6° Action de présence. Force catalytique. — Certains corps peuvent, par leur simple présence, déterminer des combinaisons ou des décompositions, qui, sans cela, ne se seraient pas produites. Telle est l'*éponge* ou *mousse de platine*. Si l'on fait pénétrer cette éponge de platine, fixée à l'extrémité d'un fil métallique, dans une éprouvette contenant un mélange de 2 volumes d'hydrogène et de 1 volume d'oxygène (*fig.* 4), on voit l'éponge devenir incandescente, grâce à la chaleur dégagée par la condensation et la combinaison des gaz dans ses pores; et bientôt les deux gaz se combinent avec détonation. Cette même éponge ou le *noir de platine* peuvent déterminer la décomposition de l'eau oxygénée. L'influence de la mousse de platine pourrait ici être attribuée à l'influence de la chaleur; mais il est un certain nombre d'actions de présence qu'on n'a pu expliquer. On dit alors, avec Berzelius qu'elles sont dues à une force inconnue, à laquelle, pour plus de commodité, il a donné un nom particulier, celui de *force catalytique*.

Fig. 4. — Action de l'éponge de platine.

LOIS DES COMBINAISONS.

12. **Loi des poids.** — *Le poids d'un composé est égal à la somme des poids des composants :* « Rien ne se perd, rien ne se crée. » L'évidence de cette loi n'est bien comprise que depuis que Lavoisier a introduit l'usage de la balance dans les laboratoires de chimie.

13. **Loi des proportions définies** ou **loi de Proust.** — *Deux corps, pour former un même composé se combinent toujours dans des proportions invariables.*— Ex. : Si, dans un mélange d'oxygène et d'hydrogène, on fait passer une étincelle électrique, les deux gaz se combineront dans le rapport de 2 volumes d'hydrogène pour un volume d'oxygène. Y a-t-il un excès de l'un des deux gaz, cet excès reste libre.

Si au lieu des volumes nous considérons les poids, nous verrons tou-

jours 1 gramme d'hydrogène s'unir avec 8 grammes d'oxygène pour former l'eau; 1gr d'hydrogène s'unir avec 35gr,5 de chlore pour former l'acide chlorhydrique.

De même 8 grammes d'oxygène s'unissent toujours avec 39 grammes de potassium pour former la potasse, avec 23 grammes de sodium pour former la soude, ou avec 33 grammes de zinc pour former l'oxyde de zinc.

14. **Loi des proportions multiples**, ou **loi de Dalton.** — Deux corps peuvent, en se combinant en diverses proportions, former plusieurs corps différents. Dalton a montré (en 1807) que, dans ce cas, *il y a toujours un rapport simple entre les différentes quantités de l'un des corps, qui se combinent avec un même poids de l'autre.* Si nous prenons pour exemple les composés de l'azote, nous voyons que :

14 grammes d'azote	peuvent	se combiner	avec 8 gr.	d'oxygène.
14	—	—	avec 16	—
14	—	—	avec 24	—
14	—	—	avec 32	—
14	—	—	avec 40	—

Ainsi, les différents poids d'oxygène, qui se combinent avec un même poids d'azote, sont entre eux comme les nombres : 1, 2, 3, 4, 5.

En étudiant les combinaisons oxygénées du manganèse on trouve cinq composés qui pour une même quantité 26 de manganèse contiennent 8, 12, 16, 24, 28, d'oxygène; poids qui sont entre eux comme 1, 3/2, 2, 3, 7/2.

Cette loi ne s'applique pas seulement aux combinaisons binaires, elle a été étendue aux sels par Wollaston. Ainsi la soude forme avec l'acide carbonique trois sels :

Le premier contient	31	de soude pour	22	d'acide carbonique.
Le second —	31	—	33	—
Le troisième —	31	—	44	—

Ces quantités d'acide carbonique sont entre elles comme 1, 3/2, 2.

15. **Loi de Gay-Lussac** ou **loi des volumes**. — Quand on recherche les poids des corps qui se combinent, il est généralement impossible d'y constater un rapport simple, mais il n'en est plus de même si au lieu des poids on considère les volumes des corps amenés à l'état gazeux. Gay-Lussac a reconnu que *les volumes des gaz qui entrent en combinaison sont toujours en rapport simple.*

Ainsi, 2 vol. d'*hydrogène* se combinent toujours avec 1 vol. d'*oxygène* pour former 2 vol. de *vapeur d'eau ;*

2 vol. de *chlore* se combinent toujours avec 2 vol. d'*hydrogène* et forment 4 vol. d'acide *chlorhydrique;*

2 vol. d'*azote* se combinent toujours avec 6 vol. d'*hydrogène* et forment 4 vol. de gaz *ammoniac.*

Dans ces exemples, les volumes des gaz qui se combinent sont donc dans le rapport de 2 à 1, ou de 2 à 2, ou de 2 à 6.

D'autre part, Gay-Lussac a remarqué que *le volume du composé considéré à l'état gazeux est aussi en rapport simple avec les volumes des composants*. C'est ce que l'on voit facilement par les exemples que nous venons de citer.

On y peut constater encore les faits suivants :

Quand les gaz se combinent à volumes égaux, il n'y a pas de contraction, le volume du composé est égal à la somme des volumes des composants.

Exemple : 2 vol. de chlore et deux vol. d'hydrogène donnent 4 vol. d'acide chlorhydrique.

Il y a toujours contraction quand les volumes qui se combinent sont inégaux. — Cette contraction est un tiers de la somme des volumes quand les deux gaz se combinent dans le rapport de 2 vol. à 1 vol.

Exemple : 2 vol. d'hydrogène et 1 vol. d'oxygène donnent 2 vol. de vapeur d'eau.

La contraction s'élève à 1/2 quand les deux gaz se combinent dans le rapport de 1 à 3.

Exemple : 2 vol. d'azote et 6 vol. d'hydrogène donnent 4 vol. de gaz ammoniac.

ÉQUIVALENTS.

16. **Nombres proportionnels. Équivalents.** — La loi des proportions définies et la loi de Dalton montrent que dans un même poids d'un composé il entre toujours les mêmes poids des corps composants, et que, par suite, des poids différents d'un composé contiennent des poids proportionnels des corps composants. On a été ainsi amené à considérer les poids des corps qui sont susceptibles de se combiner et on les a appelés *nombres proportionnels.* Nous verrons plus tard que l'un de ces nombres une fois choisi conventionnellement tous les autres sont déterminés; ce sont les poids des différents corps qui peuvent se combiner, par exemple, comme nous le disions plus haut (13), soit avec 1gr d'hydrogène, soit avec 8gr d'oxygène.

Ces mêmes lois nous prouvent que les poids des différents corps qui peuvent se déplacer et se remplacer les uns les autres vis-à-vis d'un même poids d'un corps donné sont aussi entre eux dans des rapports fixes, puisqu'ils doivent former avec ce corps des combinaisons définies.

En faisant agir, par exemple, sur l'eau, le potassium ou le sodium, le fer ou le zinc, on constate que pour mettre 1gr d'hydrogène en liberté il faut toujours employer 39gr de potassium, 23gr de sodium, 33gr de zinc ou 28gr de fer.

On appelle ***équivalents*** les poids des corps susceptibles de se remplacer ainsi, de jouer le même rôle, de s'équivaloir vis-à-vis d'un même corps, vis-à-vis de 8 d'oxygène par exemple. D'après cela, 39, 23, 33, 28 et 1 seront les équivalents du potassium, du sodium, du zinc, du fer et de l'hydrogène.

Bien que nous ayons à revenir plus tard et avec détail sur les équivalents, nous ferons remarquer dès maintenant que ces chiffres qui représentent les ***équivalents*** sont pour les divers corps dans les mêmes rapports que les ***nombres proportionnels***, car, par cela même qu'ils se remplacent vis-à-vis de 8 d'oxygène, c'est qu'ils sont précisément les quantités nécessaires pour former avec ce poids d'oxygène l'eau, la potasse, la soude, l'oxyde de zinc et l'oxyde de fer.

La loi de Gay-Lussac nous conduirait à considérer les ***équivalents en volumes***, c'est-à-dire les volumes relatifs dans lesquels les gaz se combinent ou se déplacent. Ce n'est d'ailleurs qu'une manière différente de considérer les équivalents, elle peut être utile parce que les rapports sont alors très-simples. — Nous aurons soin d'indiquer l'équivalent en volume des différents corps à côté de leur équivalent en poids, toutes les fois que cet équivalent en volume aura pu être déterminé.

NOMENCLATURE.

17. La nomenclature chimique est l'ensemble des règles adoptées pour nommer les corps. Les principes en ont été établis en 1787 par Guyton de Morveau, avec le concours de Lavoisier, Fourcroy et Berthollet.

Les corps simples ont généralement conservé les noms par lesquels ils étaient primitivement désignés; d'autres ont, au moment de leur découverte tiré leur nom de celui d'un de leurs composés plus anciennement connu : comme le ***potassium***, extrait de la ***potasse***. Pour certains corps, on a voulu indiquer dans le nom une propriété regardée comme caractéristique : tels sont l'***oxygène***, l'***azote***, le ***brôme***, etc. — Ces dénominations ont des inconvénients : ainsi, l'oxygène n'est pas le seul corps qui engendre les acides; nous ne connaissons pas que l'azote qui soit irrespirable, ni que le brôme qui ait une odeur désagréable. On évite toute difficulté en donnant aux corps nouveaux des noms brefs, faciles à distinguer de ceux des autres substances déjà connues.

18. Les corps simples, au nombre de 64, sont divisés en deux groupes : les ***métalloïdes***, au nombre de 15, et les ***métaux***, au nombre de 49.

Les ***métaux*** possèdent, quand ils sont en masse, un éclat caractéristique, appelé ***éclat métallique;*** ils sont bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité; ils forment avec l'oxygène au moins une base.

Les ***métalloïdes*** sont dénués de cet éclat; ils conduisent mal la chaleur et l'électricité; ils ne forment pas de base avec l'oxygène.

Nous rapprochons dans les deux tableaux ci-joints les corps qui présentent des propriétés chimiques analogues.

MÉTALLOÏDES.

Oxygène. . . .	O	8
Soufre. . . .	S	16
Sélénium. . .	Se	40
Tellure. . . .	Te	64
—		
Fluor.	Fl	19
Chlore. . . .	Cl	35,5
Brôme.	Br	80
Iode.	Io	127
Azote.	Az	14
Phosphore. . .	Ph	31
Arsenic. . . .	As	75
—		
Carbone. . . .	C	6
Bore..	Bo	11
Silicium . . .	Si	21
—		
Hydrogène. . .	H	1

MÉTAUX

Thallium. . . .	Ta	204
Cæsium. . . .	Cs	133
Rubidium. . .	Ru	85
Potassium. . .	K	39
Sodium. . . .	Na	23
Lithium. . . .	Li	7
Calcium. . . .	Ca	20
Strontium. . .	St	44
Barium. . . .	Ba	68
—		
Magnésium. . .	Mg	12
Aluminium. . .	Al	14
Glucinium. . .	Gl	7
Zirconium. . .	Zi	33,5
Yttrium.. . . .	Yt	32
Thorium . . .	Th	59,5
Cérium. . . .	Ce	47
Lanthane . . .	La	48
Didyme . . .	Di	»
Erbium. . . .	Er	»
Terbium. . . .	Tb	»
Manganèse. . .	Mn	26
—		
Fer.	Fe	28
Nickel.	Ni	29,5
Cobalt.	Co	29,5
Chrome. . . .	Cr	26
Zinc.	Zn	33
Vanadium. . .	Va	68,5
Cadmium . . .	Cd	56
Uranium. . . .	Ur	60
—		
Tungstène. . .	Tu	92
Molybdène. . .	Mo	48
Osmium. . . .	Os	99,5
Tantale. . . .	Ta	92
Titane.	Ti	25
Étain.	Sn	59
Antimoine. . .	Sb	120
Niobium. . . .	Nb	»
Pélopium. . .	Pe	»
Ilménium. . .	Il	»
—		
Cuivre.	Cu	31,5
Plomb.	Pb	104
Bismuth . . .	Bi	106
—		
Mercure. . . .	Hg	100
Palladium. . .	Pa	53
Rhodium. . . .	Ro	52
Ruthénium. . .	Ru	52
Argent. . . .	Ag	108
Platine. . . .	Pl	98,5
Iridium. . . .	Ir	98,5
Or.	Au	98,2

19. Corps composés en général.— Au moment où furent établis les principes de la nomenclature des composés, on attribuait à l'oxygène une importance à part, que semblait justifier la récente explication des phénomènes de la combustion et de la respiration. C'est pour cette raison qu'on a adopté pour les composés oxygénés des règles différentes de celles qui s'appliquent aux autres corps.

20. Composés oxygénés. — Parmi les composés binaires oxygénés, les uns jouissent des propriétés acides; on les appelle des *oxacides*, ou par abréviation des *acides;* les autres sont basiques ou neutres, et réunis sous le nom d'*oxydes*.

1° Acides (*oxacides*). — Lorsqu'un corps simple ne forme avec l'oxygène qu'un seul composé acide, on désigne cet acide en prenant le nom de ce corps simple, suivi de la terminaison *ique;* exemple : l'*acide carbonique* résulte de la combinaison du carbone et de l'oxygène. — Comme l'oxygène n'est pas le seul corps susceptible de former des acides avec le carbone, il vaudrait mieux dire : acide *oxycarbonique*.

Si le même corps forme avec l'oxygène deux acides, on conservera la terminaison *ique* pour celui des deux qui contient le plus d'oxygène, tandis que l'autre prendra la terminaison *eux;*

Exemple : *Acide phosphorique*, *acide phosphoreux*.

Ces règles suffirent pendant quelques années, mais bientôt on reconnut que le même corps peut former avec l'oxygène plus de deux acides; alors, pour altérer le moins possible la nomenclature admise, il est convenu que lorsqu'on trouve un acide moins oxygéné que l'acide en *eux*, on indique sa place dans la série en faisant précéder le nom de l'acide en *eux* du préfixe *hypo;*

Exemple : *acide hyposulfureux.*

Si l'acide, tout en étant moins oxygéné que l'acide en *ique*, l'est plus que l'acide en *eux*, on indique cette composition en conservant la terminaison *ique*, et se servant encore du préfixe *hypo;*

Exemple : *acide hyposulfurique.*

Si enfin on trouve un acide plus oxygéné que l'acide en *ique*, le préfixe *hyper* suffit pour le classer;

Exemple : *acide hyperiodique.*

Le chlore nous fournit la série complète :

Acide *hypochloreux*,
— *chloreux*,
— *hypochlorique*,
— *chlorique*,
— *hyperchlorique.*

2° Oxydes. — Quand un corps simple ne forme avec l'oxygène qu'un

seul oxyde; on le désigne en faisant suivre le mot *oxyde* du nom du corps simple;

Exemple : *oxyde de carbone.*

Si le même corps forme avec l'oxygène plusieurs oxydes, celui qui, pour 1 équivalent de métal, contient 1 équivalent d'oxygène, s'appelle ***protoxyde;*** on appelle ***sesquioxyde, bioxyde*** ceux qui contiennent 3/2 ou 2 équivalents d'oxygène;

Exemples : *Protoxyde de manganèse,*
Sesquioxyde —
Bioxyde —.

Beaucoup d'oxydes ont conservé les noms sous lesquels on les connaissait autrefois, ex.: potasse, soude, chaux.

3° Sels. — Les sels résultant de la combinaison d'un acide et d'une base oxygénés rappellent dans leur nom chacun des corps binaires qui ont servi à les former. On modifie seulement la terminaison de l'acide.

Si l'acide est terminé en ***ique***, le nom ***générique*** est terminé en ***ate :*** l'acide ***chlorique*** forme les ***chlorates :***

Ex.: *Chlorate de potasse;*

L'acide ***hyposulfurique*** forme les ***hyposulfates :***

Ex.: *Hyposulfate de soude.*

Si l'acide est terminé en ***eux***, le nom générique du sel est terminé en ***ite :*** l'acide ***chloreux*** formera les ***chlorites :***

Ex.: *Chlorite d'oxyde d'argent;*

L'acide ***hypochloreux*** forme les ***hypochlorites :***

Exemples: *Hypochlorite de chaux.*

Si le sel contient pour 1 équivalent de base plus de 1 équivalent d'acide, 3/2, 2 ou 3 équivalents par exemple, on emploie les préfixes ***sesqui, bi, tri***, placés devant le nom générique du sel;

Exemple : ***sesquicarbonate de soude, bisulfate de potasse.***

S'il y a pour un équivalent d'acide plus d'un équivalent de base, 2/3, 2, 3 éq. par ex., on emploie les mots ***sesquibasique, bibasique, tribasique***, etc.;

Exemple : ***azotate bibasique de mercure, acétate tribasique de plomb.***

Deux sels du même genre, c'est-à-dire ayant le même acide avec des bases différentes, forment en se combinant, ce qu'on appelle un ***sel double :***

Exemple : ***sulfate double d'alumine et de potasse (alun).***

21. **Composés non oxygénés.** — Pour nommer ces corps, on termine par ***ure*** le nom du corps ***électro-négatif**** analogue à l'oxygène, et on met ensuite le nom du corps ***électro-positif;*** exemple :

Sulfure de carbone,
Chlorure de potassium.

* Dans les composés formés par un métalloïde et un métal, c'est toujours le métalloïde qui est électro-négatif.

Si le corps contient plus d'un équivalent du corps électro-négatif, on emploie encore les préfixes *proto, sesqui, bi, tri*, etc. :

Protosulfure de potassium,
Bisulfure —
Trisulfure —
Quadrisulfure —
Pentasulfure —

22. **Exceptions.** — La règle précédente est soumise à deux exceptions :

1° Si le composé jouit de propriétés *acides*, on rappelle cette propriété en revenant à la règle des acides oxygénés. Ainsi, de même que la combinaison de l'oxygène avec le soufre (électro-positif par rapport à l'oxygène) s'appelle acide *oxy-sulfur-ique*, de même la combinaison du soufre avec l'hydrogène (électro-positif par rapport au soufre) s'appellera acide *sulf-hydr-ique*.

On aura de même :

L'acide *chlor-hydr-ique*,
L'acide *sulfo-carbon-ique*.

2° Si les deux corps simples qui constituent le composé sont des métaux, le composé prend le nom d'*alliage :* alliage de *cuivre* et de *zinc* (*laiton*) ; alliage de *cuivre* et d'*étain* (*bronze*).

Si le mercure est l'un des deux métaux, l'alliage prend le nom d'*amalgame :* amalgame d'or.

23. **Notation chimique.** — Pour représenter les corps *simples*, on emploie un symbole formé d'une ou de deux lettres. Ainsi :

O représente l'Oxygène,
S — le Soufre,
C — le Carbone,
Ca — le Calcium,
Cd — le Cadmium,
Co — le Cobalt.

La seconde lettre évite la confusion qui pourrait se produire entre les corps dont les noms commencent par la même lettre. Ces mêmes symboles représentent en même temps l'équivalent du corps. Ainsi O représente 8 grammes d'oxygène ; H, 1 gramme d'hydrogène ; S, 16 grammes de soufre ; C, 6 grammes de carbone, et ainsi de suite.

Les composés binaires sont représentés par la réunion des symboles de leurs éléments, en commençant par l'élément *électro-positif.*

L'eau est représentée par. . . . HO,
Le sulfure de plomb par . . . PbS.

Ces nouveaux symboles indiquent en même temps la composition du

corps : HO indique que l'eau est formée de 1 gramme d'hydrogène et de 8 grammes d'oxygène; Pb S représente 104 de plomb combinés avec 16 de soufre.

Si le composé contient plusieurs équivalents de l'un des corps, on place à la droite et en haut du symbole de ce dernier un chiffre qui indique ce nombre d'équivalents. Les composés de l'azote énumérés précédemment (14) ont pour symboles :

$$AzO\,;\ AzO^2\,;\ AzO^3\,;\ AzO^4\,;\ AzO^5.$$

Le sesquioxyde de fer, contenant 2 équivalents de fer pour 3 d'oxygène, s'écrit Fe^2O^3.

Pour représenter un sel, on écrira d'abord le symbole de la base c'est-à-dire de l'élément électro-positif, puis le symbole de l'acide ou élément électro-négatif, séparé du premier par une virgule : KO, SO^3 représente du sulfate de potasse, et indique que ce sel est formé de $39 + 8 = 47$ de potasse pour $16 + 24 = 40$ d'acide sulfurique.

Ces notations permettent de représenter d'une manière très-simple les réactions chimiques. Ainsi la formule

$$MnO^2 + SO^3 = O + MnO, SO^3$$

indique que si l'on fait réagir dans des conditions convenables (39) de l'acide sulfurique sur du bioxyde de manganèse, l'oxygène est mis en liberté, et il se forme du sulfate de protoxyde de manganèse.

CRISTALLISATION.

24. On dit qu'un corps *cristallise* lorsque, en passant lentement de l'état liquide ou de l'état gazeux à l'état solide, il prend des formes régulières et géométriques, qu'on appelle *cristaux*.

On peut provoquer la cristallisation d'un corps par *voie sèche* ou par *voie humide*.

25. **Cristallisation par voie sèche.** — La cristallisation par voie sèche est celle dans laquelle on n'emploie l'intermédiaire d'aucun liquide dissolvant. On la réalise :

1° En laissant refroidir un corps fondu sous l'influence de la chaleur seule, et *décantant* la partie restée liquide au moment où la solidification a commencé sur la surface et les parois. Cette cristallisation par fusion réussit très-bien pour le *soufre* et le *bismuth*.

2° En vaporisant (*sublimant*) un corps dont les vapeurs, en se condensant, passent immédiatement à l'état solide. Cette cristallisation par sublimation réussit pour l'*iode*, l'*arsenic* et le *camphre*.

26. **Voie humide.** — La voie humide est celle dans laquelle on fait

dissoudre le corps à cristalliser dans un liquide qui l'abandonne ensuite par refroidissement ou évaporation. On la réalise :

1° En saturant un liquide à chaud, et laissant refroidir. Ce procédé réussit très-bien pour les corps qui, comme le *nitre*, sont beaucoup plus solubles à chaud qu'à froid ;



Fig. 5. — Groupe de cristaux d'alun.

2° En dissolvant le corps dans un liquide qu'on laisse ensuite évaporer; c'est par ce procédé que, sur les bords de la mer, on obtient le sel ordinaire dans les marais salants. On l'applique plus particulièrement aux corps qui ne sont pas beaucoup plus solubles à chaud qu'à froid.

27. **Cristaux. Forme, structure.** — Quel que soit le procédé de cristallisation employé, on obtient toujours des solides terminés par des faces planes, qui, dans les cristaux isolés et complets, sont parallèles deux à deux. Les angles dièdres ou polyèdres sont toujours saillants. Si on observe des angles rentrants, ils résultent de l'agglomération de plusieurs cristaux. C'est ce que nous montre la *figure* 5, qui représente un groupe de cristaux d'alun.

La forme géométrique n'est pas toujours apparente à l'extérieur, mais la structure cristalline se manifeste généralement dans la cassure. Cette cassure se fait alors suivant des faces planes appelées faces de *clivage*.

28. **Systèmes cristallins.** — On appelle *système cristallin* l'ensemble des formes qui peuvent se déduire d'un même type par des facettes additionnelles ou facettes de modification. Ces facettes additionnelles peuvent remplacer soit les dièdres, soit les sommets des angles solides du cristal primitif; mais, dans tous les cas, et quel que soit le nombre de ces facettes, tous les cristaux d'un même système présentent les mêmes *axes de symétrie*.

Les modifications de la forme type conduisant aux formes secondaires sont soumises à la loi suivante, connue sous le nom de *loi de symétrie :*

Toutes les fois qu'un élément géométrique de la forme type se modifie d'une certaine manière, tous les autres éléments identiques se modifient de la même manière soit quant au nombre des facettes, soit quant à leur disposition. Ainsi, pour ne prendre qu'un exemple, si, dans le cube,

un sommet d'angle solide est modifié, il pourra être remplacé par une facette unique également inclinée (*fig.* 6) sur les trois faces qui forment cet angle solide, parce qu'elles sont toutes trois identiques, et tous les angles solides se modifieront aussi par une facette unique, disposée de la même manière. Si ce même angle solide s'était modifié par trois facettes additionnelles (*fig.* 7), elles auraient été disposées de la même façon, chacune par rapport aux trois faces qui comprennent cet angle solide, et tous les autres angles se seraient modifiés de même.

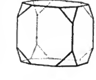


Fig. 6.

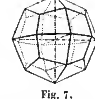


Fig. 7.

Il y a six *systèmes cristallins*, qui se distinguent les uns des autres soit par le nombre, soit par la disposition de leurs axes :

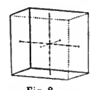


Fig. 8.
Cube de sel marin.

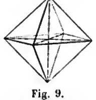


Fig. 9.
Octaèdre d'alun.

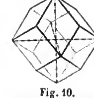


Fig. 10.
Dodécaèdre de grenat.

1° Le système *cubique* est caractérisé par l'existence de trois axes rectangulaires identiques; ex. : *sel marin* (*fig.* 8), *alun* (*fig.* 9), *grenat* (*fig.* 10).

2° Le système du *prisme droit à base carrée* est caractérisé par trois axes rectangulaires, deux identiques, le troisième différent; ex. : *oxyde d'étain naturel* (*fig.* 11).

3° Le système du *prisme droit à base rectangle*, est caractérisé par trois axes rectangulaires non identiques; exemple : *soufre naturel* (*fig.* 12), *sulfate de baryte* (*fig.* 13)



Fig. 11.
Octaèdre à base carrée
(Oxyde d'étain).

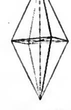


Fig. 12.— Octaèdre à base rectangle
(Soufre natif).

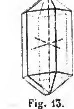


Fig. 13.
Prisme droit à base rectangle
(Sulfate de baryte).

4° Le système du *prisme droit à base parallélogramme*, ou système *clino-rhombique* est caractérisé par trois axes non identiques, deux obliques et le troisième perpendiculaire aux deux autres; ex. : *soufre*

cristallisé par fusion (*fig.* 14), *sulfate de chaux naturel* ou *gypse* (*fig.* 15).

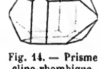


Fig. 14. — Prisme clino-rhombique (Soufre par fusion).



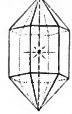
Fig. 15. — Prisme clino-rhombique (Gypse).



Fig. 16. — Prisme oblique (Sulfate de cuivre).

5° Le système du *prisme oblique à base parallélogramme*, a pour forme type un parallélipipède obliquangle; ex. : *sulfate de cuivre* (*fig.* 16).

6° Le système du *prisme hexagonal droit* est caractérisé par quatre axes, trois identiques, inclinés à 60°, et le quatrième perpendiculaire aux trois autres; ex. : *quartz* ou *cristal de roche* (*fig.* 17), *spath d'Islande* (*fig.* 20).



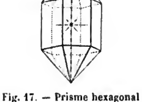


Fig. 17. — Prisme hexagonal (quartz).



Fig. 18. — Rhomboèdre (Spath d'Islande).

Comme un cristal n'a pas d'ordinaire toutes ses faces également développées, ou même n'a qu'une partie de ses faces, lorsqu'il est adhérent, il faut, pour déterminer son système cristallin, avoir recours à d'autres considérations que celles des axes, et qui se tirent également de la loi de symétrie :

Si, dans un cristal, un angle solide trirectangle est modifié par une facette unique également inclinée sur les trois faces, ce cristal est du système cubique; il est du système du prisme droit à base carrée, si cette facette est également inclinée sur deux faces seulement de l'angle solide; il est du système du prisme droit à base rectangle si cette facette est inclinée différemment sur les trois faces de l'angle solide, etc.

29. **Dimorphisme**. — On appelle *dimorphisme* la propriété que possèdent certains corps de pouvoir, lorsqu'on les place dans des conditions différentes, cristalliser dans deux systèmes distincts. Le soufre, dissous dans le sulfure de carbone, donne, par évaporation, à froid, des *octaèdres droits* à base rectangle. Le soufre fondu dans un creuset cristallise en se refroidissant vers 111°, en *prismes obliques*. Le carbonate de chaux cristallise dans le troisième système à une température élevée; il cristallise à froid dans le sixième système.

30. **Polymorphisme**. — Quelques substances très-rares cristallisent dans plus de deux systèmes, on les appelle des corps *polymorphes*.

31. **Isomorphisme.** — Souvent des corps appartenant au même système cristallin et susceptibles de présenter dans leurs cristaux les mêmes modifications secondaires peuvent se trouver *réunies dans un même cristal en proportion quelconque.* Ces corps prennent pour cette raison le nom de corps *isomorphes.*

Exemple : le carbonate de chaux et le carbonate de magnésie appartiennent tous deux au système hexagonal et présentent tous deux les mêmes modifications secondaires; aussi trouve-t-on dans la nature une substance cristalline appelée *dolomie* qui est formée de carbonate de chaux et de carbonate de magnésie dans des proportions très-variables. Le carbonate de chaux et le carbonate de magnésie sont donc deux corps isomorphes.

De même encore, si l'on porte un cristal d'alun ordinaire dans une dissolution saturée d'alun de chrôme, le cristal continue à s'accroître comme dans sa propre dissolution. L'alun ordinaire et l'alun de chrôme sont donc aussi des corps isomorphes.

Si, au lieu de mettre le cristal d'alun ordinaire dans une dissolution d'alun de chrôme, on l'avait mis dans une dissolution de sel marin, le cristal aurait cessé de s'accroître, bien que ce dernier corps appartienne aussi au système cubique, et le sel se serait déposé à sa surface en petits cristaux tout pareils à ceux qui se seraient déposés sur un corps étranger quelconque. C'est que l'alun et le sel marin, tout en appartenant au même système, ne présentent pas dans leurs cristaux les mêmes modifications secondaires et par suite ne sont pas des corps isomorphes.

L'isomorphisme, découvert par Mitscherlich, a acquis une grande importance en chimie depuis qu'on a reconnu que les *substances isomorphes ont des constitutions chimiques analogues.* Ainsi les carbonates de chaux, de magnésie, de fer, de manganèse qui sont isomorphes ont la même composition chimique : de l'isomorphisme de deux substances on peut conclure l'analogie de constitution chimique. — C'est en se fondant sur cette observation qu'on a été conduit à donner à l'*alumine*, isomorphe du *sesquioyde de fer* (Fe^2O^3), la formule Al^2O^3, de préférence à AlO.

MÉTALLOÏDES

CHAPITRE PREMIER.

Oxygène, — Hydrogène, — Eau.

OXYGÈNE (O).

Équiv. en poids = 8
Équiv. en vol. = 1^{vol}

Historique. — L'oxygène (ὀξύς, acide, γεννάω, j'engendre) a été découvert en 1774 par Priestley en Angleterre, et par Scheele en Suède. Deux ans après, Lavoisier fit connaître ses propriétés principales et le rôle qu'il joue dans la respiration et dans la combustion.

32. **Propriétés physiques**. — L'oxygène est un gaz incolore, inodore et sans saveur. Sa densité est 1,1056 ; 1 litre de ce gaz à 0° pèse donc $1^{gr},293 \times 1,1056 = 1^{gr},430$.

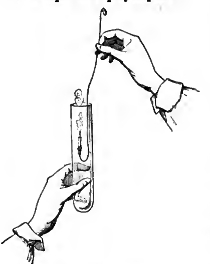


Fig. 19. — Oxygène.

Il est peu soluble dans l'eau, qui n'en dissout que 41 millièmes de son volume à 0° ; il faut par suite 24 litres d'eau pour en dissoudre 1 litre.

On n'a pu le liquéfier ni par pression, ni par refroidissement, c'est ce qu'on appelle un gaz *permanent*.

33. **Propriétés chimiques**. — L'oxygène est éminemment propre à la combustion. Il se combine avec la plupart des corps, et souvent avec dégagement de chaleur et de lumière. Qu'on plonge dans une éprouvette pleine d'oxygène (*fig.* 19) une bougie imparfaitement éteinte, c'est-à-dire présentant quelques points en ignition, elle se rallume instantanément.

34. COMBUSTIONS.— Si, dans un flacon à large goulot, plein d'oxygène, on introduit un *charbon* ardent, contenu dans une coupelle de terre fixée à l'extrémité d'un fil de fer (*fig.* 20), on le voit brûler avec une vive lumière, puis s'éteindre peu à peu. Le gaz du flacon est devenu impropre à la combustion, il trouble l'eau de chaux, rougit faiblement la teinture de tournesol ; c'est de l'acide *carbonique* CO^2.



Fig. 20. — Combustion du charbon.

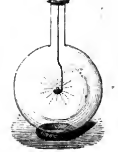


Fig. 21. — Combustion du phosphore.



Fig. 22. — Combustion du fer.

Le *soufre* enflammé, placé dans les mêmes conditions (*fig.* 20), brûle avec une flamme bleuâtre très-intense ; le produit de la combustion est un gaz d'une odeur suffocante, qui rougit fortement la teinture de tournesol ; on l'appelle l'acide *sulfureux*, SO^2.

Le *phosphore* allumé brûle dans l'oxygène avec une lumière éclatante qui éblouit les yeux (*fig.* 21); le produit est une poussière blanche, très-acide, très-soluble dans l'eau, et qu'on nomme l'acide phosphorique, $Ph\,O^5$.

Les *métalloïdes* ne sont pas les seuls corps susceptibles de brûler avec chaleur et lumière dans le gaz oxygène.

Un *fil de fer* ou un ressort de montre enroulé en spirale, et portant à son extrémité libre un petit morceau d'amadou enflammé, y brûle avec incandescence, en lançant de tous côtés de vives étincelles (*fig.* 22); le produit est de l'*oxyde* de fer, $Fe^3\,O^4$, qui, se détachant en gouttelettes, tombe au fond du flacon, et s'y incruste profondément.

35. OXYDATIONS LENTES. — En opposition à ces combustions vives nous trouvons l'oxydation lente du fer au contact de l'oxygène ou de l'air en présence de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique à la température ordinaire, réaction qui donne la rouille, $Fe^2\,O^3,\ HO$; celle du phosphore, qui donne de l'acide phosphoreux, $Ph\,O^3$; celle du cuivre, du plomb ou du mercure à une température plus ou moins élevée.

La respiration est elle-même un phénomène d'oxydation lente : le sang veineux abandonne dans les poumons de l'acide carbonique, et prend en échange de l'oxygène, qui, pendant la circulation, brûle peu à peu

une partie du carbone du sang; cette combinaison produit assez de chaleur pour entretenir constante la température du corps entier.

36. **Définition de la combustion.** — Lavoisier donnait le nom de combustion à toute combinaison d'un corps avec l'oxygène. Il appelait *combustion vive* l'oxydation accompagnée de chaleur et de lumière, *combustion lente* celle qui ne produit qu'un faible dégagement de chaleur

On donne aujourd'hui le nom de *combustion* à toute combinaison qui s'effectue avec chaleur et lumière, quelle que soit d'ailleurs la nature des corps qui produisent ces phénomènes. Ainsi la combinaison de l'hydrogène avec le chlore s'effectuant avec incandescence est une combustion tout aussi bien que celle d'hydrogène avec l'oxygène.

37. **État naturel.** — L'oxygène est, de tous les corps, le plus répandu dans la nature. Il existe à l'état de mélange dans l'air, dont il forme les 21 centièmes en volume. A l'état de combinaison c'est un des éléments de l'eau, d'un grand nombre de minéraux et de la plupart des substances végétales ou animales.

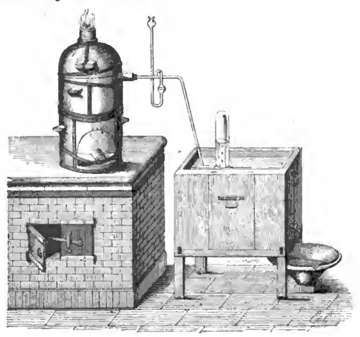


Fig. 23.
Préparation de l'oxygène par la calcination du bioxyde de manganèse.

38. **Préparation.** — On pourrait songer à retirer l'oxygène de l'air, mais comme on ne connaît aucun corps qui puisse s'emparer uniquement

de l'azote, avec lequel il est mélangé, il faudrait, pour extraire l'oxygène de l'air, le faire entrer d'abord en combinaison soit avec le *mercure* chauffé à 350°, comme l'a fait Lavoisier, soit avec la *baryte* portée au rouge sombre, comme l'a conseillé M. Boussingault, et réduire ensuite par une forte chaleur l'*oxyde de mercure* ou le *bioxyde de baryum* obtenus. De ces deux procédés, le premier est trop lent et trop coûteux ; le second, plus économique, n'est pas encore assez rapide.

On préfère décomposer un des corps oxygénés, qu'on trouve dans la nature ou que l'industrie prépare.

39. **Emploi du manganèse**. — L'oxyde le plus commode à employer est le bioxyde de manganèse ou *manganèse naturel*. Pour en extraire l'oxygène, on peut choisir l'un des deux procédés suivants :

1° On en remplit aux deux tiers une cornue de grès, qu'on chauffe dans un fourneau à réverbère (*fig*. 23) ; le col de la cornue est fermé par un bouchon que traverse un tube recourbé, amenant le gaz sous une éprouvette placée sur la planchette d'une cuve à eau. — Il faut laisser perdre les premières bulles de gaz ; elles sont formées de l'air qui était contenu dans la cornue et d'un peu d'acide carbonique provenant du carbonate de chaux que renferme toujours le manganèse naturel.

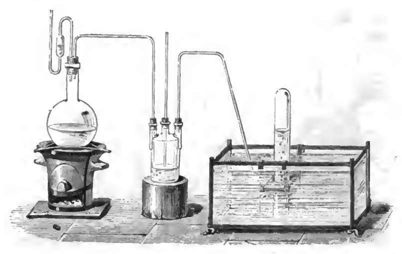


Fig. 24.
Préparation de l'oxygène par le bioxyde de manganèse et l'acide sulfurique.

Dans cette préparation, le bioxyde *noir* de manganèse, décomposable au rouge vif, abandonne le tiers de son oxygène, et se change en un oxyde *brun* rougeâtre, indécomposable. La réaction peut s'exprimer par la formule

$$3\,MnO^2 = 2\,O + Mn^3O^4.$$

L'oxyde brun, Mn^3O^4, est appelé odxye salin, parce qu'il peut être regardé comme résultant de la combinaison du protoxyde basique avec le sesquioxyde jouant le rôle d'acide,

$$Mn^3O^4 = MnO, Mn^2O^3.$$

2° On peut encore extraire l'oxygène du bixoyde de manganèse en le soumettant, dans un ballon de verre, à l'action de l'acide sulfurique concentré (*fig.* 24).

On chauffera légèrement avec quelques charbons le ballon, fermé par un bouchon que traverse un tube de dégagement, le gaz se rendra dans un flacon laveur, puis sous l'éprouvette placée, soit encore sur la cuve à eau, soit sur un test à gaz au fond d'une terrine en grès remplie d'eau.

En présence de l'acide sulfurique, le bioxyde de manganèse, qui ne peut pas jouer le rôle de base, se dédouble en oxygène, qui devient libre, et en protoxyde basique, qui, s'unissant à l'acide, forme du sulfate de manganèse :

$$MnO^2 + SO^3, HO = O + MnO, SO^3 + HO.$$

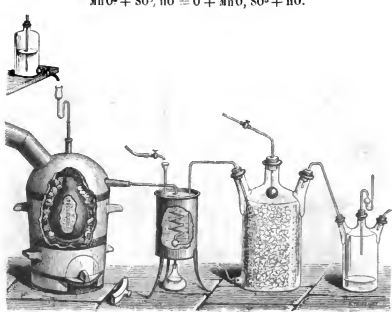


Fig. 25. — Préparation de l'oxygène par l'acide sulfurique.

40. **Acide sulfurique.** — MM. H. Sainte-Claire Deville et Debray ont montré qu'on peut aussi extraire l'oxygène de l'acide sulfurique du commerce. Ce liquide tombe goutte à goutte dans un tube de platine qui pénètre dans la tubulure supérieure d'une cornue de grès pleine de

rognures de platine ou de fragments de briques, destinés à rendre la température bien égale en tous les points (*fig.* 25).

Il se produit là un dédoublement de l'acide sulfurique en acide sulfureux et en oxygène, qui peut être représenté par la formule :

$$SO^3HO = SO^2 + O + HO.$$

Les deux gaz s'échappent, avec un peu d'acide non décomposé, par le col de la cornue pour aller passer dans un serpentin où l'acide sulfurique entraîné se condense, tandis que l'acide sulfureux, suivant l'oxygène, va se dissoudre dans un grand flacon plein de pierre-ponce constamment arrosée d'eau ; l'oxygène se dégage parfaitement pur. Ce procédé, employé industriellement, aura l'avantage de donner de l'oxygène *pur* et à *très-bas prix*, tandis que le gaz extrait du bioxyde de manganèse contient toujours, outre l'acide carbonique, un peu d'azote provenant des azotates que renferme le bioxyde naturel.

41. **Chlorate de potasse.** — Si l'on veut préparer rapidement de l'oxygène pur ; on doit employer le chlorate de potasse : 50 grammes de ce sel, chauffés à l'aide d'une lampe à alcool, dans une cornue de verre munie d'un tube à dégagement, peuvent fournir 20 litres d'oxygène (*fig.* 26).

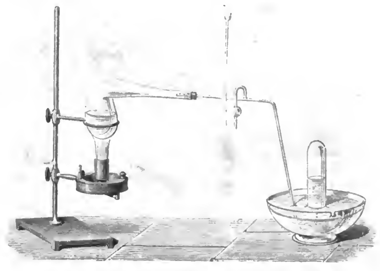


Fig. 26. — Préparation de l'oxygène par le chlorate de potasse.

On doit chauffer lentement d'abord pour éviter une décomposition trop brusque ; si la réaction se ralentit après un premier dégagement de gaz, c'est qu'une partie de l'oxygène s'est portée sur le chlorate non encore altéré et l'a transformé en perchlorate ; il suffit d'augmenter la

chaleur pour décomposer ce nouveau sel à son tour. La réaction définitive s'exprime par la formule

$$KO, ClO^5 = 6O + KCl.$$

La décomposition du chlorate se fait plus régulièrement, sans formation de perchlorate, si l'on ajoute au sel son poids de bioxyde de cuivre ou d'oxyde *brun* de manganèse. Il n'y a pas altération de l'oxyde dans cette circonstance; c'est une simple action de présence. L'oxyde *brun* provenant de la calcination du bioxyde naturel doit être préféré à ce dernier qui introduirait dans l'oxygène un peu d'acide carbonique et d'azote.

42. **Ozone.** — On appelle ainsi l'oxygène odorant, qui jouit d'affinités chimiques encore plus fortes que l'oxygène ordinaire. — Agissant sur un papier amidonné, imprégné d'iodure de potassium, l'ozone s'empare du potassium pour former de la potasse, et met ainsi en liberté l'iode, qui colore l'amidon en bleu. Cette réaction sert à reconnaître la présence de l'ozone. — Mis en présence d'une dissolution d'iodure de potassium, l'ozone est absorbé et change l'iodure en iodate; cette propriété permet de déterminer la quantité d'ozone existant à l'état de mélange avec l'oxygène ordinaire.

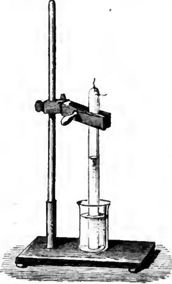


Fig. 27. — Production d'ozone par une série d'étincelles électriques.

L'ozone humide oxyde à froid le mercure, l'argent, l'acide sulfureux, l'ammoniaque. Il perd ses propriétés quand on le chauffe à 240°, ou même à 100° en présence de la vapeur d'eau; le charbon en poudre et le bioxyde de manganèse le ramènent par simple contact à l'état d'oxygène ordinaire.

L'ozone se produit dans la décomposition de l'eau acidulée par la pile, ou encore lorsqu'on fait passer une série d'étincelles dans l'oxygène ordinaire (*fig.* 27). Il se produit aussi dans la décomposition du bioxyde de baryum par l'acide sulfurique à froid. On en prépare des quantités notables en faisant passer de l'air humide sur du phosphore à froid.

HYDROGÈNE (H)

Équiv. en poids = 1
Équiv. en vol. = 2^{vol}

Ses principales propriétés ne sont connues que depuis les recherches de Cavendish en 1777.

43. **Propriétés physiques.** — L'hydrogène est un gaz *permanent*, incolore, inodore, et sans saveur quand il est pur.

Sa densité est 0,0692 ; par suite un litre d'hydrogène à 0° pèse $1^{gr},293 \times 0,0692 = 0^{gr},089$. — C'est le plus léger de tous les gaz ; il pèse 14 fois et demie moins que l'air. Cette propriété l'a fait employer quelque temps pour les aérostats ; mais on a été obligé de renoncer à cette application parce que ce gaz tamise à travers toutes les membranes. On lui préfère aujourd'hui le gaz de l'éclairage quoiqu'il soit un peu plus lourd.

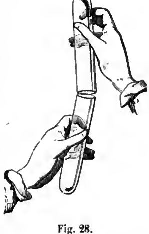


Fig. 28.

Pour mettre en évidence cette extrême légèreté de l'hydrogène, on peut, après avoir rempli une vessie avec ce gaz, en gonfler des bulles de savon, qui s'élèvent dans l'atmosphère, où elles s'enflamment à l'approche d'une bougie. On peut aussi aboucher deux éprouvettes, l'une (*fig.* 28) inférieure remplie d'hydrogène, l'autre supérieure pleine d'air. En quelques instants l'échange des gaz a lieu ; une bougie brûle dans l'éprouvette inférieure, elle enflamme l'hydrogène dans l'éprouvette supérieure.

L'hydrogène est très-peu soluble dans l'eau : 1 litre de ce liquide n'en dissout que 17 centimètres cubes.

C'est le plus réfringent de tous les gaz. Il est le seul qui conduise bien la chaleur et l'électricité.

44. **Propriétés chimiques.** — L'hydrogène a une grande affinité par l'oxygène, il brûle au contact de l'air et d'une bougie enflammée, en donnant naissance à de l'eau.

Gaz éminemment combustible, il ne peut entretenir la combustion. Ainsi, une bougie allumée qu'on plonge (*fig.* 29) dans une éprouvette pleine d'hydrogène et tenue verticalement l'orifice en bas, s'éteint après avoir mis le feu aux premières couches en contact avec l'air ; si on la retire lentement, elle se rallume en sortant.

La combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène se fait avec une forte détonation quand on approche une bougie du goulot d'un flacon dans lequel on a mélangé 2 volumes d'hydrogène pour 1 volume d'oxygène. L'énorme dilatation qui résulte de la chaleur dégagée dans cette combinaison projette hors du flacon la plus grande partie de la va-

Fig. 29.

Fig. 30. — Briquet à hydrogène.

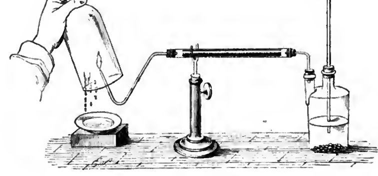


Fig. 31. — Production de vapeur d'eau par la combustion de l'hydrogène.

peur d'eau formée; à cette dilatation succède un vide produit par la condensation de la vapeur, et l'air se précipite dans le flacon : les deux bruits qui résultent de ces mouvements brusques des gaz constituent

la détonation. — Il faut avoir soin d'entourer le flacon d'un linge pour éviter les éclats de verre dans le cas où le flacon se briserait.

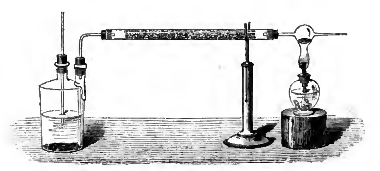


Fig. 32. — Réduction de l'oxyde de fer.

Au lieu de mêler 2 volumes d'hydrogène avec 1 volume d'oxygène, on aurait pu mêler 2 volumes d'hydrogène et 5 volumes d'air, car nous verrons que l'air contient $\frac{1}{5}$ de son volume d'oxygène. La détonation, dans ce cas, eût été moins forte, le mélange étant dilué dans 4 volumes d'azote.

La combustion aurait pu être déterminée par le passage d'une étincelle électrique ou par le contact de l'éponge de platine. On emploie ce dernier moyen dans le ***briquet à hydrogène*** (*fig.* 30).

Pour démontrer que le produit de la combustion est de la vapeur d'eau, il suffit d'enflammer le gaz, préalablement desséché, à l'extrémité d'un tube effilé placé sous une cloche froide. On voit bientôt l'eau ruisseler sur les parois de cette cloche (*fig.* 31).

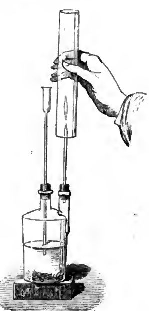


Fig. 33. — Harmonica chimique.

L'affinité de l'hydrogène pour l'oxygène permet de l'utiliser pour la réduction des oxydes : Un courant rapide de ce gaz passant sur du sesquioxyde de fer légèrement chauffé (*fig.* 32), lui enlève son oxygène pour former de l'eau qui se dégage ; le résidu est le fer ***pyrophorique***, ainsi appelé parce qu'il s'enflamme spontanément au contact de l'air à la température ordinaire.

45. **Harmonica chimique.** — Quand on entoure la flamme d'un gros tube ouvert aux deux bouts (*fig.* 33), on entend un son continu dû à une série de petites explosions produites par des mélanges d'air avec de l'hydrogène entraîné, mélanges qui détonnent dans la partie supérieure de la flamme. Cet appareil est appelé *harmonica chimique*.

46. **Chaleur de combustion.** — L'hydrogène pur brûle avec une flamme très-pâle, semblable en cela à toutes celles dans lesquelles il n'y a pas de corps solide. Nous verrons en effet bientôt que la présence d'un corps solide incandescent est la seule condition nécessaire pour qu'une flamme devienne brillante.

Cette flamme si peu éclairante est extrêmement chaude; l'hydrogène est, en effet, de tous les combustibles celui qui dégage le plus de chaleur. 1 kilogramme de ce gaz en brûlant dégage 34400 *calories*, c'est-à-dire la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 100° 344 kilogrammes d'eau.

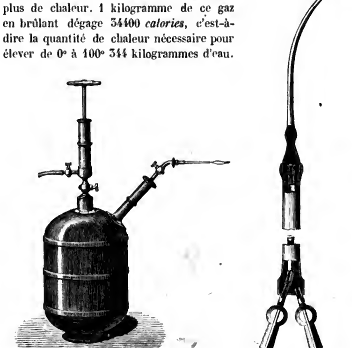


Fig. 34.
Chalumeau à gaz oxygène et hydrogène réunis.

Fig. 35.
Chalumeau à gaz oxygène et hydrogène séparés.

47. **Chalumeau.** — On utilise cette chaleur dans le *chalumeau* à gaz oxygène et hydrogène. Quelquefois on réunit les deux gaz dans un récipient (*fig.* 34) sous une pression considérable; dans ce cas il suffit d'ou-

vrir un robinet, pour que le mélange s'échappe par un tube de petit diamètre dans lequel ils est obligé de passer à travers les mailles d'un grand nombre de toiles métalliques. Ces toiles, par leur conductibilité, refroidiraient la flamme, si elle venait à rentrer dans le tube, et de cette façon empêcheraient l'explosion redoutable du mélange.

Il est plus prudent d'employer un chalumeau où les deux gaz sont comprimés dans des réservoirs distincts (*fig.* 35). L'oxygène et l'hydrogène ne se mélangent que dans un tube capillaire au voisinage du point où se fait la combustion. Un robinet disposé sur chacun des conduits permet de régler à volonté la sortie des gaz.

Pour fondre le platine avec cet appareil, on commence par mettre le métal dans une petite cavité creusée sur un morceau de chaux vive, puis on dirige sur lui le dard de manière à ce que l'ouverture du chalumeau n'en soit qu'à quelques millimètres. On pourra de la même façon fondre et volatiliser le cuivre, l'argent, l'or.

Cette haute température a été utilisée pour souder les feuilles de plomb par leur bord sans interposition d'un métal étranger ; c'est la ***soudure autogène*** de Desbassyns de Richemond. On réunit de même les bords des tubes de platine avant de les étirer.

Le dard du chalumeau dirigé sur un bâton de craie lui donne un éclat extraordinaire. Cette lumière, dite ***lumière de Drummond***, peut être utilisée comme moyen d'éclairer les objets placés dans le microscope, qui prend alors le nom de ***microscope à gaz***.

48. **Préparation.** — L'hydrogène s'extrait de l'eau, qui en contient 1/9 de son poids. On peut, nous l'avons déjà dit, décomposer l'eau soit par la pile, soit à l'aide du platine en fusion ; mais ce ne sont là que des expériences de physique.

Pour préparer l'hydrogène on se fonde sur la propriété qu'ont les métaux de décomposer l'eau pour s'emparer de son oxygène. Les métaux des deux premières sections décomposent l'eau à froid ou à une température inférieure à 100°, mais ils sont ou excessivement rares ou très-coûteux ; ne pouvant les utiliser, on aura recours à l'un des deux procédés suivants :

1° On pourra employer le *fer*, qui décompose l'eau au rouge sombre.

Pour obtenir de l'hydrogène à l'aide de ce métal on fait bouillir de l'eau dans une cornue de verre (*fig.* 36) dont le col s'engage dans un tube de porcelaine ou de grès contenant des fils de fer et chauffé dans un fourneau à réverbère. A l'autre extrémité s'adapte un tube à dégagement qui permet de recueillir le gaz. La vapeur d'eau sortant de la cornue donne, en passant sur le fer, une réaction qui s'exprime par la formule

$$4HO + 3Fe = 4H + Fe^3O^4.$$

2° Au lieu d'opérer à la chaleur rouge, on peut décomposer l'eau par le

fer à froid, à la condition de faire intervenir un acide capable de s'emparer de l'oxyde qui tend à se produire. Le fer est généralement remplacé dans ce cas par le zinc.

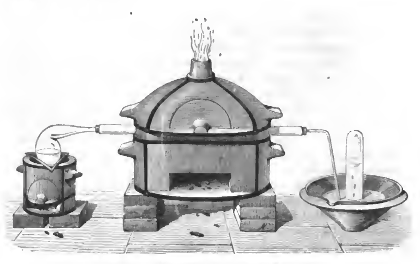


Fig. 36. — Décomposition de l'eau par le fer.

On introduit le métal dans un flacon à deux tubulures à moitié plein d'eau (*fig.* 37). L'une des tubulures porte un tube à dégagement qui se rend sur la cuve à eau, l'autre porte un tube droit à entonnoir et plongeant dans le liquide. Ce dernier tube sert à verser l'acide sulfurique au fur et à mesure que le dégagement se ralentit. Avec 100 grammes de zinc et 160 grammes d'acide sulfurique on obtient environ 30 litres de gaz.

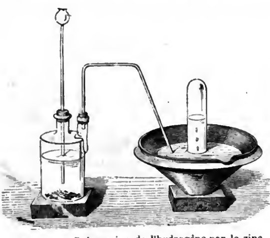


Fig. 37. — Préparation de l'hydrogène par le zinc.

Dans cette préparation le zinc ne décompose l'eau que grâce à la ten-

dance de l'acide sulfurique à s'unir à l'oxyde de zinc qui peut prendre naissance,

$$Zn + SO^3, HO = ZnO, SO^3 + H.$$

Si on avait employé le fer, on aurait eu

$$Fe + SO^3, HO = FeO, SO^3 + H.$$

L'acide sulfurique peut être remplacé par l'acide chlorhydrique ; on a alors

$$Zn + HCl = H + ZnCl.$$

49. **Purification.** — L'hydrogène résultant de ces réactions n'est jamais complétement pur. Il renferme toujours un carbure d'hydrogène d'une odeur désagréable, de l'acide sulfhydrique et de l'arséniure d'hydrogène. Ces impuretés proviennent de ce que le zinc contient un peu de carbone, de soufre et d'arsenic.

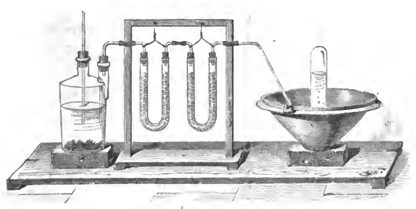


Fig. 38. — Préparation de l'hydrogène pur.

Pour purifier le gaz, il faut le faire passer à travers des tubes en U (*fig.* 38) contenant, le premier, de la potasse qui retiendra le carbure d'hydrogène et l'acide sulfhydrique, le deuxième, du bichlorure de mercure qui retiendra l'arséniure d'hydrogène.

EAU (HO).

Équiv. en poids = 9
Éq. de la vapeur en vol. = 2^{vol}

50. **Propriétés physiques.** — L'eau se présente sous trois états : elle existe à l'état de glace pendant l'hiver, ou sur les monta-

gues élevées ; à l'état liquide dans les rivières, les lacs et la mer ; à l'état de vapeur dans l'atmosphère. Elle se solidifie à 0° et cristallise alors en étoiles appartenant au système du prisme hexagonal (*fig.* 39).

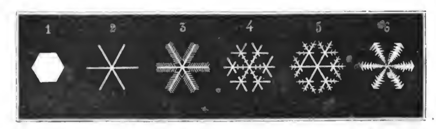


Fig. 39. — Neige.

Pendant cette solidification l'eau augmente de volume, aussi la glace est-elle plus légère que l'eau; sa densité est 0,93.

Chauffée à partir de 0° l'eau se contracte jusqu'à 4° pour se dilater ensuite si sa température continue à s'élever. Sa densité à 4° a été prise pour unité. L'eau entre en ébullition à 100° sous la pression de 0,760. La densité de sa vapeur est 0,623.

L'eau est incolore sous une petite épaisseur ; elle est d'un bleu indigo sous une grande épaisseur quand elle est pure, telle est l'eau qui sort des glaciers, celle du lac de Genève, par exemple; enfin elle est plus ou moins verte quand elle contient des matières étrangères.

L'eau jouit de la propriété de dissoudre des gaz et des sels, nous en verrons bientôt l'application.

51. **Propriétés chimiques.** — L'eau est un oxyde qui peut jouer indifféremment le rôle de base vis-à-vis des acides forts, et d'acide vis-à-vis des bases énergiques.

Action de la chaleur. L'eau se décompose sous l'influence de la chaleur de fusion du platine, quand on coule lentement ce métal en fusion dans un mortier en fonte contenant de l'eau, on a un dégagement de bulles formées d'un mélange détonant d'oxygène et d'hydrogène.

Le *courant de la pile*, décompose également l'eau : l'hydrogène se porte au pôle négatif, l'oxygène au pôle positif.

Plusieurs *métalloïdes* la décomposent, les uns pour s'emparer de son oxygène, comme le carbone, les autres pour s'emparer de son hydrogène comme le chlore.

Parmi les *métaux*, ceux qu'on appelle nobles, tels que l'argent, l'or, le platine, sont les seuls qui ne la décomposent pas pour s'emparer de son oxygène ; tous les autres, s'unissant à l'oxygène, mettent l'hydrogène de l'eau en liberté à une température plus ou moins élevée.

52. **Composition de l'eau.** — L'eau est formée en poids de 8 grammes d'oxygène pour 1 gramme d'hydrogène. En volumes, elle est formée de 2 volumes d'hydrogène et de 1 volume d'oxygène condensés en 2 volumes de vapeur d'eau.

Cette composition peut être établie soit par l'analyse, soit par la synthèse.

53. **Analyse par le fer.** — La première analyse de l'eau a été faite par Lavoisier. Il faisait passer de la vapeur d'eau sur du fer chauffé au rouge. Le fer s'emparait de l'oxygène et l'hydrogène se dégageait. On pouvait connaître le poids de l'eau décomposée en recueillant l'hydrogène après l'avoir fait passer préalablement dans un serpentin où la vapeur d'eau non décomposée se condensait.

54. **Analyse par la pile.** — Carlisle et Nicholson décomposèrent l'eau en 1800 par le courant voltaïque. On se sert pour répéter l'expérience de l'appareil que nous avons déjà décrit (*fig.* 4) et qu'on appelle un *voltamètre*. Dès que le courant passe (*fig.* 40), on voit des bulles se produire autour des fils et se réunir sous les petites éprouvettes; on constate ainsi que le volume de l'hydrogène est double de celui de l'oxygène.

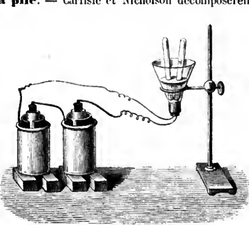


Fig. 40. — Analyse de l'eau.

55. **Synthèse en volumes.** — 1° C'est encore Lavoisier qui a le premier fait la synthèse de l'eau. Aidé de Meusnier, il fit arriver un courant convenablement réglé de chacun des deux gaz oxygène et hydrogène dans un ballon où la combinaison s'effectuait sous l'influence de l'étincelle électrique jaillissant entre deux boutons métalliques placés au centre du ballon et communiquant l'un avec une machine électrique et l'autre avec le sol.

2° Gay-Lussac et de Humboldt ont fait la synthèse de l'eau à l'aide de l'eudiomètre (*fig.* 41). Si, dans l'eudiomètre à mercure on fait passer 100 volumes d'oxygène et 100 volumes d'hydrogène, on trouve par la détonation déterminée par le passage de l'étincelle électrique,

il ne reste que 50 volumes de gaz qui sont de l'oxygène car ils peu-

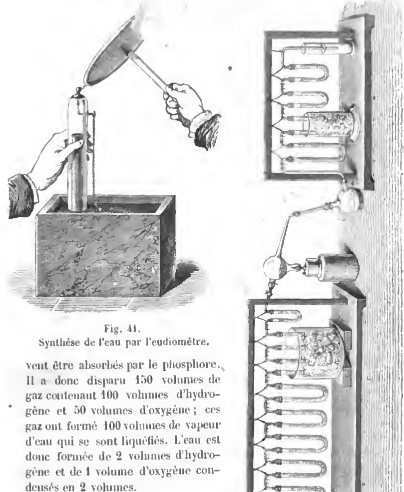


Fig. 41.
Synthèse de l'eau par l'eudiomètre.

Fig. 42. — Synthèse de l'eau (Dumas).

vent être absorbés par le phosphore. Il a donc disparu 150 volumes de gaz contenant 100 volumes d'hydrogène et 50 volumes d'oxygène ; ces gaz ont formé 100 volumes de vapeur d'eau qui se sont liquéfiés. L'eau est donc formée de 2 volumes d'hydrogène et de 1 volume d'oxygène condensés en 2 volumes.

56. **Synthèse par les poids.** — Au lieu de chercher les volumes d'oxygène et d'hydrogène qui se combinent pour former l'eau, on peut se proposer de déterminer par l'expérience combien un poids donné d'eau renferme d'hydrogène et

Cette méthode, due à Berzelius et Dulong, consiste à faire passer un courant d'hydrogène sec et pur sur un poids connu d'oxyde de cuivre chauffé dans un tube de verre. L'oxyde se réduit, il se forme de l'eau que l'on recueille et qu'on pèse; la perte de poids de l'oxyde donne le poids de l'oxygène, le poids de l'hydrogène est égal la différence entre le poids de l'eau et celui de l'oxygène. Ce procédé a été appliqué par M. Dumas avec toutes les précautions nécessaires pour assurer aux résultats une exactitude absolue. Dans ses expériences, l'hydrogène, bien débarrassé des carbure (*fig.* 42), sulfure et arséniure d'hydrogène, est desséché par de l'acide phosphorique anhydre refroidi. Un ballon de verre très-peu fusible contient l'oxyde de cuivre, et communique avec un second ballon refroidi dans lequel l'eau va se condenser. Des tubes en U, pleins d'acide phosphorique anhydre, arrêtent la vapeur d'eau qui ne se serait pas condensée dans le ballon.

57. **Composition de l'eau ordinaire.** — Nous venons de faire connaître la composition de l'eau pure. Or, dans la nature, ce liquide ne se trouve jamais à l'état de pureté. L'eau de pluie elle-même contient en dissolution les gaz de l'atmosphère, et souvent, pendant les orages, de l'azotate d'ammoniaque. L'eau des sources, des rivières, des fleuves contient, non-seulement des gaz, mais différents sels dont la nature dépend du terrain qu'elle a traversé.

58. **Gaz dissous dans l'eau.** — Pour recueillir les gaz qu'une eau tient en dissolution, on remplit de cette eau un ballon d'un litre fermé par un bouchon que traverse un tube également plein d'eau et aboutissant sous une éprouvette placée sur la cuve à mercure (*fig.* 43). En chauffant peu à peu jusqu'à l'ébullition, on voit apparaître les bulles de gaz qui vont se rendre sous l'éprouvette. Au bout d'un quart d'heure d'ébullition, l'expérience est terminée. — On absorbe l'acide carbonique par la potasse, et on analyse le résidu par l'eudiomètre. 1 litre d'eau ordinaire donne environ 50 centimètres

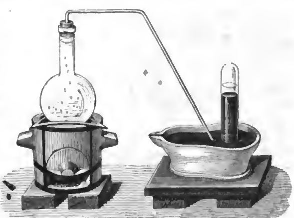


Fig. 43 — Extraction des gaz dissous dans l'eau.

cubes de gaz contenant la moitié de son volume d'acide carbonique; le reste est formé d'air contenant 32 pour 100 d'oxygène et 68 pour 100 d'azote.

Presque tout l'acide carbonique obtenu existait en combinaison avec le carbonate de chaux à l'état de bicarbonate soluble. L'acide carbonique n'existe jamais qu'en petite quantité à l'état de simple dissolution. Ainsi l'eau de pluie ayant séjourné à l'air ne donne guère que 25 centimètres cubes de gaz contenant moins d'un centimètre cube d'acide carbonique.

L'air dissous dans l'eau sert à la respiration des poissons, des mollusques, des zoophytes et des plantes aquatiques.

59. **Sel dissous dans l'eau**. — Les matières solides que l'eau ordinaire tient en dissolution peuvent y exister, soit en vertu de leur solubilité propre, comme les sulfates de chaux et de magnésie, les chlorures de potassium et de sodium, les traces d'azotates; soit, grâce à la présence de l'acide carbonique, comme la silice et les carbonates de chaux et de magnésie.

L'eau soumise à une ébullition prolongée se trouble par suite du dépôt de ces derniers corps. — Pour recueillir les premières substances il faut évaporer l'eau à siccité.

Le poids total varie de 0gr,1 à 0gr,3 par litre d'eau.

Quelques réactions très-simples permettent de constater la présence des principaux sels :

La présence du *bicarbonate de chaux* se reconnaît à l'aide de quelques gouttes d'une *teinture alcoolique* jaune de bois de campêche qui se colore alors en rouge violacé.

S'il y a des *sulfates, l'azotate de baryte* donne un précipité blanc de sulfate de baryte.

S'il y a des *chlorures, l'azotate d'argent* forme un précipité blanc, *caillebotté* de chlorure d'argent.

La *chaux* peut être précipitée par *l'oxalate d'ammoniaque* à l'état d'oxalate de chaux.

Dans le cas où il y aurait des *matières organiques, le chlorure d'or* produirait une coloration brune.

L'eau distillée ne donne de précipité avec aucun de ces réactifs.

60. **Eau séléniteuse, Eau potable**. — On appelle *séléniteuse* une eau qui contient beaucoup de sulfate de chaux; telle est l'eau des puits de Paris. Cette eau forme avec le savon des grumeaux insolubles, ce qui la rend impropre au savonnage; elle produit avec la matière azotée des végétaux un corps dur qui nuit à la cuisson des légumes. On peut corriger cette eau à l'aide du carbonate de soude, qui précipite la chaux à l'état de carbonate de chaux; elle peut alors servir au savonnage.

Une eau est bonne comme *boisson* quand elle est bien aérée et qu'elle ne donne par l'évaporation qu'un résidu au plus égal à 0gr,3 par litre; si la proportion des matières solides devient plus considérable, l'eau est *lourde* et *indigeste*.

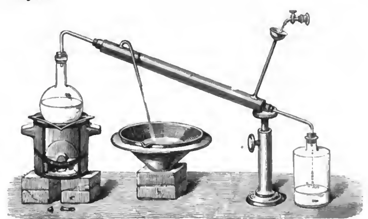


Fig. 44. — Distillation de l'eau.

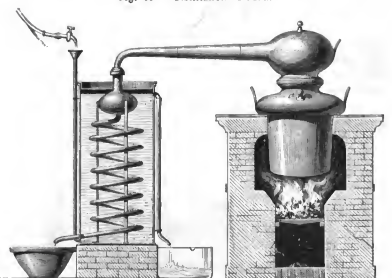


Fig. 45. — Alambic ordinaire.

On reconnait facilement une eau *potable* à ce qu'elle ne se colore que faiblement en violet par la teinture de campêche, et ne forme pas de grumeaux avec le savon.

Les eaux qui contiennent beaucoup de matières organiques sont mauvaises, elles se corrompent trop facilement.

61. **Eau distillée.** — Pour avoir de l'eau distillée, on peut se servir, soit d'une petite cornue communiquant avec un ballon refroidi (*fig.* 44), soit de l'alambic ordinaire décrit dans le cours de physique (*fig.* 45). On ne recueille pas les premières gouttes d'eau qui peuvent contenir les impuretés provenant des parois du réfrigérant. Il faut d'ailleurs s'arrêter quand les trois quarts de l'eau ont passé à la distillation; afin d'éviter les projections de matières entraînées à l'état solide, et l'acide chlorhydrique gazeux qui pourrait résulter de la décomposition des chlorures par la silice.

CHAPITRE II

Azote. — Air.

AZOTE (Az).

Équiv. en poids = 14
Équiv. en vol. = 2^{vol}

Découvert en 1772 par Rutherford.

62. **Propriétés physiques.** — L'azote est un gaz *permanent*, incolore inodore et sans saveur. — Sa densité, par rapport à l'air, est 0,9713; par suite, un litre d'azote pèse $1^{gr},293 \times 0,9713 = 1^{gr},256$.

L'eau n'en dissout que $\frac{1}{40}$ de son volume; un litre de ce liquide dissout donc 25 centimètres cubes d'azote.

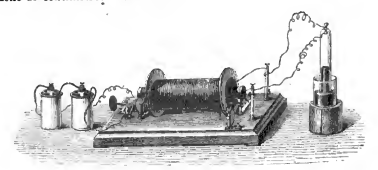


Fig. 46. — Combinaison d'O et d'Az par l'électricité.

63. **Propriétés chimiques.** — L'azote se distingue facilement des gaz oxygène et hydrogène que nous avons étudiés : il ne s'enflamme pas

au contact de l'air, il n'est donc pas combustible; il n'est pas davantage comburant, car il éteint les corps en combustion. Il partage cette dernière propriété avec l'acide carbonique, mais il s'en distingue en ce qu'il ne trouble pas l'eau de chaux. — L'azote n'entretient pas la respiration.

Ce gaz ne se combine à la température ordinaire avec aucun corps, mais sous l'influence des étincelles électriques (*fig.* 46), en présence de corps capables d'absorber le produit de la combinaison, il s'unit soit avec l'oxygène, soit avec l'hydrogène.

A une température élevée, il se combine avec le bore et avec plusieurs métaux.

64. **État naturel.** — Il existe à l'état de simple mélange dans l'air atmosphérique, dont il forme les $\frac{4}{5}$ en volume. On le trouve à l'état de combinaison dans un plus grand nombre de substances animales, végétales ou minérales.

65. **Préparation.** — On le retire ordinairement de l'air.

1° Par le phosphore. — On met un morceau de phosphore dans une petite coupelle de terre placée sur un large bouchon de liége flottant à la surface d'une cuve à eau (*fig.* 47). On enflamme le phosphore et on recouvre le tout d'une cloche. Le phosphore brûle aux dépens de l'oxygène de l'air en produisant des poussières blanches d'acide phosphorique anhydre, qui se dissolvent peu à peu dans l'eau. Au bout de quelques instants, le phosphore s'éteint, l'atmosphère s'éclaircit pendant que l'eau monte dans la cloche.

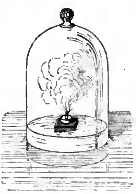


Fig. 47. — Préparation de l'azote par le phosphore.

Remarque. — Dans le premier moment, par suite de la dilatation qui résulte de la chaleur produite par la combustion, une partie du gaz sortirait de la cloche si l'on n'avait la précaution de l'enfoncer un peu dans l'eau.

L'azote ainsi préparé n'est pas complétement pur; il contient encore une petite quantité d'oxygène et de l'acide carbonique.

2° Par le cuivre. — On fait passer dans un tube de verre contenant du cuivre et chauffé au rouge, de l'air préalablement dépouillé de son acide carbonique (*fig.* 48); le cuivre s'empare de l'oxygène, et l'azote se dégage pur. — L'air contenu dans un flacon à deux tubulures en est chassé par de l'eau qui arrive par un tube droit à entonnoir. Il passe dans un tube à potasse que retient l'acide carbonique, puis pénètre dans le tube rempli de cuivre.

3° Par l'azotite d'ammoniaque. — On chauffe dans une petite cornue

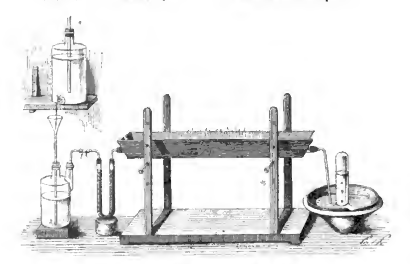


Fig. 48. — Préparation de l'azote par le cuivre.

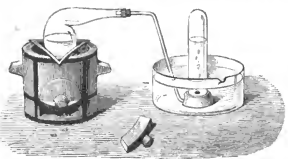


Fig. 49. — Préparation de l'azote par l'azotite d'ammoniaque.

de verre de *l'azotite d'ammoniaque* (*fig.* 49). Grâce à la faible affinité de l'azote pour l'oxygène et pour l'hydrogène, ces deux derniers gaz se combinent pour former de l'eau l'azote est mis en liberté; la réaction est la suivante :

$$AzH^3HO, AzO^3 = 2Az + 4HO.$$

Nous verrons bientôt, en parlant de l'action du chlore sur l'ammoniaque, une autre réaction qui permet également d'obtenir de l'azote.

AIR.

66. **Propriétés physiques**. — L'air, est incolore sous une petite épaisseur, et bleuâtre sous une épaisseur très-grande; il est inodore et sans saveur.

Sa densité est $\frac{1}{773}$ de celle de l'eau. 1 litre d'air à 0° sous 0,760m, pèse 1gr,293. A la température t° et sous la pression H, son poids est

$$1^{gr},293 \times \frac{1}{(1 + 0,00367\, t)} \times \frac{H}{760}.$$

67. **Composition.** — Lavoisier le premier fit connaître la composition de l'air. Il chauffa du mercure dans un ballon de verre (*fig.* 50) dont le col, très-long et doublement recourbé, allait aboutir, en se relevant, jusque dans le haut d'une éprouvette graduée reposant sur une cuve à mercure, et aux trois quarts remplie d'air.

Au bout de quelques heures, il vit apparaître de petites pellicules rouges à la surface du mercure; en continuant à chauffer pendant douze jours, il reconnut que les pellicules, qui avaient d'abord été en augmentant, cessaient de s'accroître. — $\frac{1}{6}$ environ du volume primitif avait disparu. Le gaz restant était impropre à la combustion et à la respiration : c'était l'azote récemment découvert par Rutherford. Quant aux pellicules rouges, chauffées dans une petite cornue de verre, elles donnèrent du mercure et un gaz dans lequel il reconnut toutes les propriétés de l'oxygène. Ces deux gaz mélangés reproduisaient d'ailleurs de l'air ordinaire.

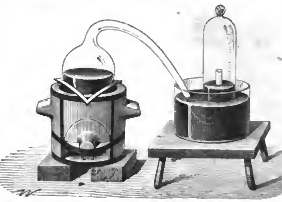


Fig. 50. — Composition de l'air (expérience de Lavoisier).

Avant cette expérience, on savait seulement que certains métaux, comme l'étain ou le mercure fortement chauffés au contact de l'air, augmentent de poids et se transforment en produits, qu'on désignait sous le nom général de *chaux métallique*, mais on ne savait pas si l'air était absorbé en totalité ou en partie seulement.

A la même époque, Scheele enleva à l'air son oxygène, au moyen des sulfures alcalins et reconnut de même l'azote dans le résidu. Cette expérience est moins concluante que celle de Lavoisier, en ce qu'elle ne permet pas de régénérer l'oxygène.

Indépendamment de l'oxygène et de l'azote, il y a toujours dans l'air un peu d'acide carbonique et de vapeur d'eau. On constate l'existence de l'acide carbonique, en exposant à l'air dans un vase plat une dissolution

limpide d'eau de chaux, qui bientôt se recouvre de pellicules blanches de carbonate de chaux.

La présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère peut être mise en évidence à l'aide d'un fragment de potasse caustique, qui se dissout peu à peu dans l'eau qu'il absorbe.


Fig. 51.
Analyse de l'air par le phosphore à froid.

68. **Analyse de l'air.** — Les expériences de Lavoisier et de Scheele tout en manifestant la composition de l'air ne peuvent pas donner les proportions des gaz qui y entrent : dans l'expérience de Lavoisier, une petite quantité d'oxygène reste libre; dans celle de Scheele, un peu d'azote peut être absorbé.

Pour trouver la composition exacte de l'air, on emploie une des méthodes suivantes :

1° Par le phosphore a froid. — Dans une éprouvette graduée reposant sur l'eau et contenant 100 centimètres cubes d'air, on fait passer un long bâton de phosphore humide (*fig.* 51); il se forme de l'acide phosphoreux qui se dissout dans l'eau dont le bâton est imprégné. Au bout de quelques heures, le phosphore ne répand plus de fumée, il n'est plus lumineux dans l'obscurité; on le retire, et en mesurant le nouveau volume, ramené à la pression ordinaire, on constate qu'il est formé de 79 centimètres cubes d'azote.


Fig. 52. — Analyse de l'air par le phosphore à chaud.

2° Par le phosphore a chaud. — On fait passer un petit fragment de phosphore dans une cloche courbe contenant un volume déterminé d'air et reposant sur l'eau (*fig.* 52). En chauffant le phosphore à l'aide d'une lampe à alcool, on le voit fondre, puis se vaporiser : une flamme pâle indiquant la combustion de la vapeur de phosphore avance progressivement; quand elle est descendue jusqu'au niveau de l'eau, l'expérience est terminée.

On trouve comme dans l'expérience précédente un résidu de 79 pour 100 d'azote.

3° Méthode eudiométrique. L'eudiomètre à eau (*fig.* 53) se compose d'un

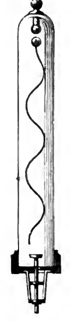
gros tube de cristal épais, fixé à ses extrémités dans des montures de cuivre munies de robinets, et terminées par des entonnoirs. La monture supérieure est traversée par une tige en cuivre isolée et arrivant dans le voisinage de la paroi métallique intérieure. Les deux montures sont réunies par une règle métallique divisée. Un long tube E partagé en 200 parties d'égale capacité peut se visser au centre de l'entonnoir supérieur. A l'appareil est joint une petite éprouvette fermée par un obturateur métallique et contenant un volume égal à 100 divisions du tube gradué.



Fig. 53.
Eudiomètre à eau.

Pour faire l'analyse de l'air à l'aide de l'eudiomètre, on y introduit d'abord à l'aide de l'éprouvette 100 volumes d'air, puis 100 vol. d'hydrogène. On fait passer ensuite l'étincelle électrique en approchant de la tige isolée le plateau d'un électrophore.

On constate qu'il ne reste après l'explosion que 137 volumes de gaz; 63 volumes ont donc disparu pour former de l'eau. Comme 2 volumes d'hydrogène exigent 1 volume d'oxygène, on doit conclure de cette expérience que $\frac{63}{3} = 21$ volumes d'oxygène se sont combinés avec 42 volumes d'hydrogène. Il y a donc dans 100 volumes d'air 21 volumes d'oxygène, et par suite 79 volumes d'azote.


Fig. 54.
Eudiomètre à mercure.

L'eudiomètre à eau présente un inconvénient : au moment où la vapeur d'eau provenant de la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène produit un vide en se condensant, une partie

de l'air dissous dans l'eau se dégage et vient augmenter le volume du résidu. On évite cette cause d'erreur en employant l'eudiomètre à mercure (*fig.* 54), qui se compose, comme le premier, d'une éprouvette en verre épais. Il est traversé, à sa partie supérieure, par une tige de fer, et se termine à sa partie inférieure par une monture de fer que l'on peut fermer à l'aide d'un bouchon à soupape de même métal, supportant un fil qui arrive à une petite distance de la tige supérieure. Nous avons donné (*fig.* 41) une autre disposition fréquemment adoptée de l'eudiomètre à mercure.

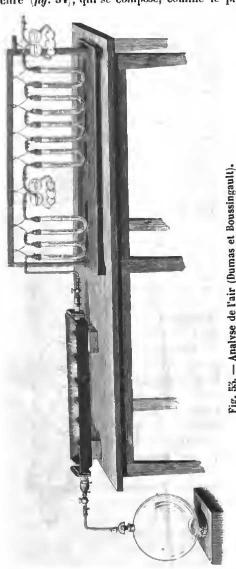


Fig. 55. — Analyse de l'air (Dumas et Boussingault).

4° Procédé de MM. Dumas et Boussingault. — Dans les analyses que nous venons d'indiquer, la composition de l'air se déduit de volumes de gaz assez petits.

MM. Dumas et Boussingault ont fixé d'une manière rigoureuse la composition de l'air en pesant l'oxygène et l'azote contenus dans un grand volume d'air. Leur appareil se compose d'un tube en verre vert (*fig.* 55) muni de deux robinets qui permettent d'y faire le vide, et contenant de la tournure de cuivre que l'on a d'abord oxydé, puis réduit, pour lui donner une porosité qui rend plus facile l'absorption de l'oxygène. L'une des extrémités du tube communique avec un ballon à robinet dans lequel on fait également le vide. L'autre extrémité communique avec des tubes en U contenant de la ponce imprégnée d'acide sulfurique destiné à dessécher l'air.

Un tube de Liebig placé en avant contient de la potasse qui absorbe l'acide carbonique et permet de régler la marche de l'opération.

Après avoir fait le vide dans le ballon et dans le tube, on détermine séparément leur poids P et p, puis on chauffe le cuivre au rouge et on ouvre le premier robinet : l'air arrive et se dépouille de son oxygène ; on ouvre alors successivement le second robinet du tube et celui du ballon en réglant les ouvertures de manière que l'expérience marche lentement.

On est averti que le ballon et le tube sont pleins d'azote quand l'air ne traverse plus le tube de Liebig. On repèse alors le ballon et le tube ; soient P′ et p' les nouveaux poids ; on fait le vide dans le tube pour en retirer l'azote, soit p'' le poids auquel il se réduit ; le poids de l'azote qui se trouvait partie dans le ballon, partie dans le tube est d'après cela $P' - P + p' - p''$. Celui de l'oxygène est $p'' - p$. On trouve ainsi que l'air

est formé en poids de : { Oxygène, 23 ; Azote, 77 } 100,

ce qui correspond aux volumes : { Oxygène, 20,8 ; Azote, 79,2 } 100.

69. **Constance de la composition de l'air.** — L'air a la même composition en tous les points de la terre et à toutes les hauteurs. Cependant, près de la surface de la mer, la quantité d'oxygène est un peu moindre à cause du grand nombre d'animaux qui, respirant l'air dissous dans l'eau de mer, forcent celle-ci à reprendre par sa surface l'oxygène qui disparaît.

70. **Dosage de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau** — Pour doser l'acide carbonique et la vapeur d'eau contenus dans l'air, M. Boussingault se sert d'un aspirateur (*fig.* 56) de 50 litres environ de capacité plein d'eau qu'on peut faire écouler par un robinet inférieur muni d'un tube recourbé qui ne permet pas la rentrée de l'air. La partie supérieure présente deux tubulures : l'une est munie d'un thermomètre qui donne la température de l'eau ou du gaz ; l'autre communique avec une série de tubes en U terminée par un tube de Liebig.

Quand on laisse écouler l'eau de l'aspirateur, l'air se dépouille de son humidité dans le tube de Liebig et dans le premier tube en U, qui contiennent tous deux de l'acide sulfurique, puis il perd son acide carbonique dans deux tubes en U à ponce imbibée de potasse. Un dernier tube à ponce sulfurique retient la vapeur d'eau qui aurait pu être enlevée à la dissolution alcaline.

Connaissant le volume de l'aspirateur, on détermine le poids P de l'air sec qui a passé et qui contenait des poids p et p' de vapeur d'eau et d'acide carbonique donnés par les tubes en U. On constate de cette façon que la proportion de vapeur d'eau est très-variable, mais que la quantité d'acide carbonique est toujours en poids de 4 à 6 dix-millièmes. — Il y a

cependant un peu plus d'acide carbonique dans les grandes villes que dans la campagne.

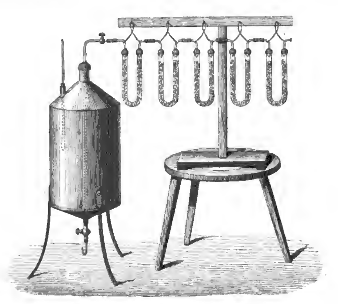


Fig. 56. — Dosage de l'acide carbonique de l'air.

On trouve encore dans l'air de petites quantités d'ammoniaque, d'acide sulfhydrique et d'un carbure d'hydrogène, indépendamment des corpuscules en nombre infini tenus en suspension.

Si l'acide carbonique provenant des combustions et de la respiration n'altère pas la composition de l'air, cela tient à l'action décomposante des parties vertes des végétaux qui, s'emparant du carbone, remettent l'oxygène en liberté.

71. **L'air est un mélange.** — L'air est un mélange et non une combinaison. C'est ce qui résulte des observations suivantes :

1° Les volumes d'oxygène et d'azote qui constituent l'air ne sont pas en rapport simple, comme cela a lieu dans toutes les combinaisons, suivant la loi de Gay-Lussac.

2° Il n'y a jamais dégagement de chaleur ni d'électricité quand on mélange l'azote et l'oxygène.

3° L'air mis en contact avec l'eau se dissout comme le ferait un simple mélange, chaque gaz selon son degré de solubilité. Ainsi nous avons vu (58) que l'air dissous dans l'eau contient 32 d'oxygène pour 68 d'azote. Si c'était une combinaison, la proportion y serait de 21 d'oxygène pour 79 d'azote, comme dans l'air atmosphérique.

CHAPITRE III

Composés de l'azote.

72. **Composition.** — L'azote forme avec l'oxygène cinq composés, dans lesquels nous pouvons trouver à la fois une vérification de la loi de Dalton ou loi des proportions multiples, et de la loi de Gay-Lussac ou loi des volumes.

Le protoxyde d'azote,	AzO,	est formé	de 14^{gr} d'azote	pour	8^{gr} d'oxygène.		
Le bioxyde d'azote	AzO^2,	—	de 14	—	pour 16	—	
L'acide azoteux,	AzO^3,	—	de 14	—	pour 24	—	
L'acide hypoazotique,	AzO^4,	—	de 14	—	pour 32	—	
L'acide azotique,	AzO^5,	—	de 14	—	pour 40	—	

Quant à la composition en volumes :

2^{vol} d'azote,	en se combinant	avec	1^{vol} d'oxygène,	donnent	2^{vol} de AzO.
2	—	—	2	—	donnent 4^{vol} de AzO^2.
2	—	—	3	—	vol. de vapeur inconnu.
2	—	—	4	—	donnent 4^{vol} de AzO^4.
2	—	—	5	—	volume de vap. inconnu.

73. **Propriétés générales.** — Tous les composés de l'azote sont décomposables par la chaleur. Le plus stable est l'acide hypoazotique, qui ne se décompose qu'au rouge. Cela explique pourquoi l'on trouve constamment l'acide hypoazotique dans les produits de la décomposition des autres composés de l'azote sous l'influence d'une chaleur peu intense.

PROTOXYDE D'AZOTE (AzO).

Équiv. en poids = 22
Équiv. en vol = 2^{vol}

Il a été découvert en 1772 par Priestley. H. Davy l'a appelé *gaz hilarant*.

74. **Propriétés physiques.** — Le protoxyde d'azote est un gaz incolore, inodore, d'une saveur légèrement sucrée.

Sa densité est 1,527; un litre de ce gaz pèse donc $1^{gr},293 \times 1,527 = 1^{gr},975$.

L'eau dissout un peu plus de son volume de ce gaz à 0°. L'alcool en dissout 4 fois son volume.

Faraday a liquéfié le protoxyde d'azote à 0°, sous la pression de 30 atmosphères; le liquide obtenu bout à — 80°. Il se solidifie quand on l'évapore rapidement sous le récipient de la machine pneumatique.

75. Propriétés chimiques. — La chaleur seule suffit pour décomposer ce gaz :

$$4 AzO = 3 Az + AzO^4.$$

Les corps combustibles le décomposent au rouge, s'emparent de son oxygène et mettent l'azote en liberté; aussi les seuls corps qui puissent brûler dans le protoxyde d'azote sont ceux dont la température est suffisante pour décomposer ce gaz ; ils y brûlent alors avec plus d'activité que dans l'air, parce que le volume de l'oxygène est moitié de celui de l'azote.

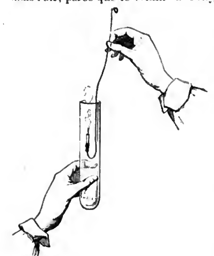


Fig. 57 — Bougie se rallumant dans le protoxyde d'azote.

Une bougie présentant quelques points incandescents se rallume dans le protoxyde d'azote, et y brûle avec éclat (*fig.* 57).

Volumes égaux d'hydrogène et de protoxyde d'azote forment un mélange qui détone à l'approche d'une bougie ou par le passage d'une étincelle électrique.

$$AzO + H = HO + Az$$

On peut produire avec ce gaz la combustion du charbon et celle du phosphore (*fig.* 58) ; quant à celle du soufre, elle ne réussit que si ce corps est bien enflammé. Le soufre mal allumé ne dégage pas assez de chaleur pour décomposer le protoxyde d'azote.

Remarque. — Les premières expériences que nous venons de citer permettraient de confondre le protoxyde d'azote avec l'oxygène; mais la dernière montre que cette confusion n'est possible qu'à une ***haute température***. A la ***température ordinaire***, le protoxyde d'azote n'est pas décomposé par les corps avides d'oxygène : le ***phosphore*** n'y répand pas de fumées blanches, il n'y est pas lumineux dans l'obscurité. Nous verrons bientôt que le ***bioxyde d'azote***, qui se transforme en acide hypoazotique au contact de l'oxygène ou de l'air, ne s'oxyde pas dans le protoxyde d'azote.

Par la même raison, le protoxyde d'azote ne peut pas entretenir la respiration : H. Davy a constaté que lorsqu'on le respire, il produit l'insensibilité, comme l'éther et le chloroforme. La difficulté d'avoir ce gaz bien privé d'acide hypoazotique ne permet pas de l'employer comme anesthésique.

76. Analyse. — Dans une cloche courbe (*fig.* 59) reposant sur le mercure et contenant un volume connu de protoxyde d'azote, on fait

passer un fragment de potassium ou de sulfure de baryum. En chauffant à l'aide d'une lampe à alcool, on détermine la décomposition du protoxyde d'azote. L'oxygène entre en combinaison, et l'azote est mis en liberté. On constate, après le refroidissement, que le volume de l'azote est égal au volume du protoxyde employé.



Fig. 58. — Combustion du charbon dans le protoxyde d'azote.



Fig. 59. Analyse du protoxyde d'azote.

Si de la densité du protoxyde	1,527
on retranche celle de l'azote.	0,972
on obtient la demi-densité de l'oxygène.	0,555

Donc, 1 volume de protoxyde d'azote contient 1 volume d'azote et $\frac{1}{2}$ volume d'oxygène condensés en un volume.

77. Préparation. — On chauffe de l'azotate d'ammoniaque dans une cornue de verre (*fig.* 60) munie d'un tube à dégagement. Le sel fond d'abord, puis se décompose en eau et protoxyde d'azote; si le sel est pur, il ne doit rien rester dans la cornue.

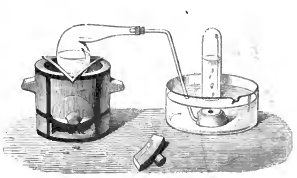


Fig. 60. — Préparation du protoxyde d'azote.

$$AzH^4O, AzO^5 = 2AzO + 4HO.$$

Il faut avoir soin de ne pas chauffer trop rapidement, afin d'éviter une

décomposition brusque et la transformation d'une partie du protoxyde en azote et en acide hypoazotique.

BIOXYDE D'AZOTE (AzO^2).

Équiv. en poids = 30
Équiv. en vol. = 4^{vol}

Découvert par Hales, il a été étudié par Priestley, Davy et Gay-Lussac.

78. **Propriétés physiques.** — C'est un gaz incolore; on ne peut connaître ni sa saveur, ni son odeur, parce qu'il se transforme, au contact de l'air, en acide hypoazotique.

Sa densité est 1,039; par suite, un litre de bioxyde d'azote pèse $1^{gr},293 \times 1,039 = 1^{gr},343$.

Il est très-peu soluble dans l'eau, qui n'en dissout guère que $\frac{1}{20}$ de son volume. Il n'a pu être ni liquéfié, ni solidifié.

79. **Propriétés chimiques.** — La chaleur le décompose, quoique moins facilement que le protoxyde :

$$2\,AzO^2 = Az + AzO^4.$$

Exposé à l'air, le bioxyde d'azote donne des *vapeurs rutilantes :* 4 volumes de bioxyde d'azote prennent 2 volumes d'oxygène :

$$AzO^2 + 2\,O = AzO^4.$$

Cette propriété est caractéristique; elle permet de reconnaître la présence de traces de bioxyde d'azote.

Quelques bulles de ce gaz suffisent pour manifester la présence de l'oxygène dans un mélange, c'est ainsi qu'on distingue l'oxygène du protoxyde d'azote.



Fig. 61. — Combustion du phosphore dans le bioxyde d'azote.



Fig. 62. — Analyse du bioxyde d'azote.

On sépare le protoxyde du bioxyde, en se fondant sur la propriété qu'ont les sels de protoxyde de fer d'absorber le bioxyde d'azote en se colorant en brun.

Les combustibles qui dégagent en brûlant assez de chaleur pour décomposer le bioxyde d'azote, y brûlent avec plus d'éclat que dans l'air, puisqu'il y a $\frac{1}{2}$ volume d'oxygène; mais il faut que la température soit plus élevée que lorsqu'il s'agit du protoxyde, car le bioxyde résiste mieux que le protoxyde à l'action de la chaleur. Aussi le phosphore enflammé (*fig.* 61) y brûle toujours, mais il pourrait être fondu dans ce gaz sans s'enflammer.

Le charbon bien incandescent y brûle; mal allumé, il s'y éteint. Le soufre n'y peut jamais brûler.

80. **Analyse.** — Elle se fait comme celle du protoxyde (*fig.* 62); il reste dans la cloche courbe la moitié du volume du gaz employé.

Si de la densité du bioxyde	1,039
on retranche la moitié de la densité de l'azote.	0,486
On trouve la demi-densité de l'oxygène	0,553

Donc, 1 volume de bioxyde contient $\frac{1}{2}$ volume d'azote et $\frac{1}{2}$ volume d'oxygène sans contraction.

81. **Préparation.** — On fait réagir à froid le cuivre sur l'acide azotique très-étendu. L'appareil se compose d'un flacon (*fig.* 63) à deux tubulures dans lequel on introduit la tournure de cuivre (50 grammes, par exemple); on remplit le flacon aux deux tiers d'eau; puis on ferme le goulot avec un bouchon traversé par un tube droit, muni d'un entonnoir. La tubulure latérale porte le tube abducteur, qui se rend sur la cuve à eau.

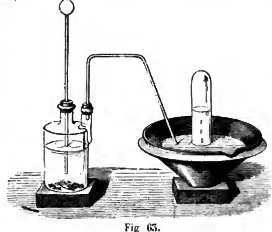


Fig 63.
Préparation du bioxyde d'azote.

On verse alors l'acide azotique (100 grammes environ) par l'entonnoir. La réaction commence : une partie de l'acide est amené à l'état de bioxyde, et le cuivre oxydé s'unit à l'acide non décomposé pour former de l'azotate de cuivre qui colore la liqueur en bleu.

$$3\,Cu + 4\,AzO^5, HO = AzO^2 + 3\,CuO, AzO^5 + 4\,HO.$$

Remarque. — Les premières bulles de bioxyde qui se dégagent se trans-

forment en acide hypoazotique aux dépens de l'oxygène de l'air contenu dans le flacon. Cet acide se dissout; il en résulte un vide, et la pression extérieure fait monter le liquide dans le tube abducteur, en même temps qu'il s'abaisse dans le tube de sûreté; l'air rentre peu à peu par ce tube, apportant un peu d'oxygène qui est bientôt absorbé et beaucoup d'azote, de sorte que l'appareil finit par être plein de ce dernier gaz. A partir de ce moment, les vapeurs rutilantes cessent de se produire, et le dégagement commence. Il faut laisser perdre les premières bulles, qui sont presque uniquement formées d'azote.

Le flacon dans lequel se produit le bioxyde d'azote doit être maintenu froid afin d'éviter la formation d'un peu de protoxyde. En remplaçant le cuivre par le mercure, on éviterait complétement le protoxyde.

ACIDE AZOTEUX (AzO^3).

Équiv. en poids = 38
Équiv. en vol. = »

82. **Propriétés physiques.** — Liquide bleu, bouillant à —10° environ. Il se décompose, par la plus faible élévation de température, en bioxyde d'azote et acide hypoazotique :

$$2AzO^3 = AzO^2 + AzO^4.$$

83. **Préparation.** — Son extrême instabilité fait qu'on ne l'obtient presque jamais à l'état de pureté.

Les azotites se préparent facilement : si on fait passer du bioxyde d'azote dans un tube légèrement chauffé et contenant du bioxyde de baryum, on obtient de l'azotite de baryte :

$$AzO^2 + BaO^2 = BaO,\ AzO^3.$$

Cet azotite peut ensuite servir à préparer tous les autres par double décomposition.

ACIDE HYPOAZOTIQUE (AzO^4).

Équiv. en poids = 46
Équiv. en vol. = 4^{vol}

84. **Propriétés physiques.** — Liquide jaunâtre à 0°, jaune rougeâtre à 15°, rouge brun à 20°. Il bout à 22° en donnant des vapeurs rutilantes, dont la densité est 1,72. Refroidi, il se solidifie à — 9° en cristaux incolores.

85. Propriétés chimiques. — C'est un liquide très-caustique, qui corrode la peau.

De tous les composés de l'azote, c'est celui qui résiste le mieux à l'action de la chaleur.

Il ne peut se combiner ni avec l'eau, ni avec les bases.

En présence d'une petite quantité d'eau, il se décompose en acide azoteux et en acide azotique :

$$2\,AzO^4 = AzO^3 + AzO^5.$$

Dans cette expérience on voit apparaître deux couches : l'inférieure, verte, est formée d'acide azoteux, mêlé d'acide hypoazotique non décomposé; la supérieure est de l'acide azotique également impur. Si on augmente la quantité d'eau, la couche verte disparait ; il ne se forme que de l'acide azotique et du bioxyde d'azote :

$$3\,AzO^4 + Aq = 2\,AzO^5,\,Aq + AzO^2.$$

En présence de la potasse, c'est toujours la première réaction qui se produit :

$$2\,AzO^4 + 2\,KO = KO,\,AzO^3 + KO,\,AzO^5.$$

86. Analyse. — On analyse l'acide hypoazotique en faisant passer un poids connu de ce corps sur du cuivre contenu dans un tube chauffé au rouge :

$$AzO^4 + 4\,Cu = 4\,CuO + Az.$$

On trouve ainsi que l'acide hypoazotique est formé de 2 volumes d'azote pour 4 volumes d'oxygène condensés en 4 volumes.

87. Préparation. — On prépare ce corps en chauffant dans une cornue en verre vert (*fig.* 64) de l'azotate de plomb parfaitement desséché. Le sel se décompose en oxyde de plomb, qui reste dans la cornue, en oxygène qui se dégage et en acide hypoazotique, qui se condense dans un tube en U entouré d'un mélange réfrigérant.

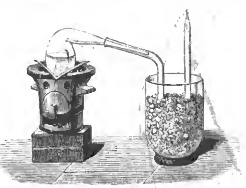


Fig. 64.
Préparation de l'acide hypoazotique.

$$PbO,\,AzO^5 = AzO^4 + O + PbO.$$

ACIDE AZOTIQUE OU NITRIQUE (AzO^5).

Équiv. en poids = 54
Équiv. en vol. = »

Découvert en 1225 par Raymond Lulle, qui, en chauffant ensemble du nitre et de l'argile, obtenait à la fois de l'acide azotique et de l'acide hypoazotique. Ce n'est qu'en 1784 que Cavendish détermina sa composition. On le connaît dans le commerce sous le nom d'*eau-forte* ou d'*esprit de nitre*

88. **Acide anhydre.** — On a cru longtemps que l'acide azotique n'existait qu'en combinaison avec l'eau; M. H. Sainte-Claire Deville l'a obtenu anhydre, sous forme de cristaux incolores, fondant à 30° en un liquide qui bout à 47° et se décompose à 80° en oxygène et en acide hypoazotique. On l'obtient en faisant passer du chlore sec sur de l'azotate d'argent contenu dans un tube en U chauffé à 60° :

$$AgO, AzO^5 + Cl = AgCl + AzO^5 + O.$$

ACIDE HYDRATÉ.

89. **Propriétés physiques.** — *Acide monohydraté.* — C'est un liquide incolore quand il est pur. Celui du commerce est ordinairement coloré en jaune par de l'acide hypoazotique. Sa densité est 1,52. Il bout à 86°, et se solidifie à —50°. Sa formule est AzO^5, HO. Il contient 14 pour 100 d'eau.

Acide quadrihydraté. — Liquide incolore, d'une densité égale à 1,42; il bout à 123°, et renferme 40 pour 100 d'eau.

90. **Propriétés chimiques.** — L'acide azotique est très-énergique ; il corrode la peau en la colorant en jaune.

La lumière et la chaleur décomposent facilement l'acide monohydraté en oxygène et acide hypoazotique; l'acide à 4 équivalents d'eau résiste mieux. Quand on chauffe l'acide concentré, l'ébullition commence à 86°, mais il se produit en même temps de l'acide hypoazotique et de l'oxygène; l'eau provenant de l'acide décomposé s'unit à l'acide restant, et élève peu à peu son point d'ébullition. Celui-ci ne devient constant que lorsqu'il a atteint 123°. A cette température, le liquide qui distille est de l'acide quadrihydraté.

Si l'on chauffe de l'acide très-étendu, l'ébullition commence à 100°, mais elle s'élève peu à peu jusqu'à 123°, pour demeurer fixe à cette température. Il a d'abord distillé de l'eau mêlée de quantités plus ou moins considérables d'acide, jusqu'à ce que le produit ait la composition de l'acide quadrihydraté.

91. **Action des métalloïdes.** — Tous les corps combustibles décomposent l'acide azotique.

L'hydrogène à l'état naissant décompose l'acide azotique à la température ordinaire, et donne de l'eau et de l'ammoniaque. La réaction peut s'exprimer par la formule suivante :

$$AzO^5 + 8H = AzH^3 + 5HO.$$

C'est ce qui se produit quand on verse un peu d'acide azotique dans un appareil ordinaire à hydrogène. Le dégagement du gaz se ralentit et peut même s'arrêter si la quantité d'acide azotique ajoutée est suffisante. Il recommence dès que tout l'acide azotique a été décomposé. L'ammoniaque formé s'est alors uni à l'acide sulfurique pour former du sulfate d'ammoniaque, qui reste en dissolution avec le sulfate de zinc.

Il se produit encore de l'ammoniaque quand l'hydrogène libre et le bioxyde d'azote ou les vapeurs soit d'acide azotique, soit d'acide hypoazotique se rencontrent sur de l'éponge de platine légèrement chauffée, comme le représente la *figure* 65.

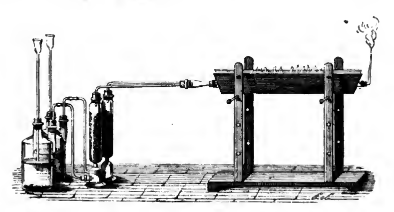


Fig. 65. — Production d'ammoniaque par le passage d'un mélange de bioxyde d'azote et d'hydrogène sur l'éponge de platine.

Le soufre, le phosphore, l'arsenic, le carbone, le bore, le silicium et l'iode décomposent l'acide azotique et donnent les acides sulfurique, phosphorique, arsénique, carbonique, borique, silicique et iodique.

Le chlore, le brôme et l'azote sont sans action.

92. Action des métaux. — Les métaux, à l'exception de l'or et du platine, décomposent l'acide azotique *ordinaire* à la température ambiante.

Si l'acide est au maximum de concentration, il n'agit que sur quelques métaux très-oxydables, parce que les azotates sont très-peu solubles dans l'acide concentré.

Mis en contact avec le fer, non-seulement il n'est pas attaqué, mais il lui fait perdre la propriété d'attaquer l'acide étendu. Dans cet état, le fer

est dit *passif*. Il redevient actif dès qu'on le touche avec une tige de cuivre.

L'acide du commerce, étendu de son volume d'eau, donne du bioxyde d'azote et des azotates avec les métaux qui ne décomposent pas l'eau en présence des acides. Cette réaction a été utilisée pour la préparation du bioxyde d'azote (78) :

$$3\,Cu + 4\,AzO^5, 4\,HO = AzO^2 + 3\,CuO, AzO^5, + 4\,HO.$$

Si l'acide était trop étendu, il ne serait plus attaqué.

L'étain et l'antimoine se transforment en oxydes acides aux dépens de l'acide azotique, qui passe encore à l'état de bioxyde d'azote.

Les métaux qui décomposent l'eau à froid en présence des acides donnent du protoxyde d'azote, si l'acide est étendu de son volume d'eau :

$$4\,Zn + 5\,AzO^5 + n\,HO = 4\,ZnO, AzO^5 + n\,HO + AzO.$$

Si l'acide était très-étendu, il pourrait être partiellement réduit, par l'hydrogène naissant, à l'état d'ammoniaque, qui, s'unissant à l'acide non décomposé, donnerait de l'azotate d'ammoniaque.

93. **Action sur les matières organiques.** — L'acide azotique colore en jaune la soie, la laine. Cette propriété est utilisée en teinture.

Le coton, plongé dans l'acide monohydraté et froid, donne un produit très-inflammable : le *coton-poudre*, qui conserve l'aspect du coton ordinaire.

94. **Synthèse.** — On peut déterminer la composition de l'acide azotique en faisant passer une série d'étincelles dans un mélange de 2 volumes d'azote et de 7 volumes d'oxygène, en présence de la potasse (*fig.* 66). A la fin de l'expérience, il ne reste que 2 volumes d'oxygène. L'acide est donc formé de 2 volumes d'azote pour 5 volumes d'oxygène.

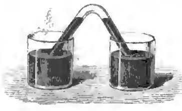


Fig. 66. — Synthèse de l'acide azotique par une série d'étincelles.

95. **État naturel.** — On trouve souvent de l'acide azotique avec d'autres composés oxygénés de l'azote dans l'atmosphère, où ils se forment sous l'influence de l'électricité des nuages ; aussi les pluies d'orage contiennent-elles souvent de l'azotate d'ammoniaque.

Il existe dans la nature des azotates de potasse, de soude, de chaux et de magnésie.

96. **Préparation.** — Dans les laboratoires, on prépare l'acide azotique en chauffant dans une cornue de verre, des poids égaux de nitre et d'acide sulfurique concentré. L'acide azotique, volatil, à la température de

l'expérience, est déplacé par l'acide sulfurique, qui l'est moins, et se dégage. On le recueille dans un ballon de verre refroidi par de l'eau, ainsi que l'indique la *fig.* 67.

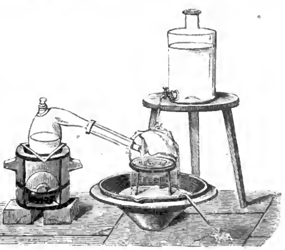


Fig. 67. — Préparation de l'acide azotique.

Comme dans cette réaction le sulfate formé rencontre un excès d'acide et passe à l'état de bisulfate, il faut, si l'on veut décomposer complétement le nitre, mettre la quantité d'acide nécessaire à la transformation de la potasse en bisulfate :

$$KO, AzO^5 + 2\,SO^3, HO = AzO^5, HO + KO, HO, 2\,SO^3.$$

Au commencement de l'opération on voit apparaître des vapeurs rutilantes, dues à ce que l'acide azotique, ne pouvant prendre l'eau qui lui est nécessaire et que l'excès d'acide sulfurique retient énergiquement, se décompose en oxygène et acide hypoazotique.

Vers la fin de l'opération, des vapeurs rutilantes se produisent encore; elles sont dues à ce que les dernières parties du nitre ne se décomposent qu'à une température où l'acide nitrique monohydraté se décompose lui-même partiellement.

Dans l'industrie, on remplace l'azotate de potasse par l'azotate de soude, qui coûte moins cher et donne, à égalité de poids, plus d'acide azotique. On introduit dans une chaudière 250 kilogrammes d'azotate de soude avec 300 kilogrammes d'acide sulfurique du commerce (60° Baumé) (*fig.* 68). On ferme la chaudière et l'on chauffe. Les vapeurs d'acide nitrique se dégagent par une tubulure latérale et se condensent dans des bouteilles ou ***bonbonnes*** de grès placées les unes à la suite des autres :

$$NaO, AzO^5 + 2\,SO^3, HO = AzO^5, HO + NaO, HO\ 2\,SO^3.$$

Les proportions ci-dessus indiquées donnent 185 kilogrammes d'acide nitrique monohydraté.

97. Purification. — L'acide nitrique du commerce contient d'ordinaire un peu d'acide chlorhydrique, parce que les azotates contiennent

souvent des chlorures alcalins. On peut encore y trouver un peu d'acide sulfurique entraîné par l'acide azotique. Pour le purifier, on y verse de l'azotate d'argent, qui précipite le chlore à l'état de chlorure d'argent et de l'azotate de baryte, qui donne avec l'acide sulfurique du sulfate de baryte insoluble, puis on distille. Pour se débarrasser des vapeurs nitreuses, on ajoute un peu de bichromate de potasse et l'on distille de nouveau.

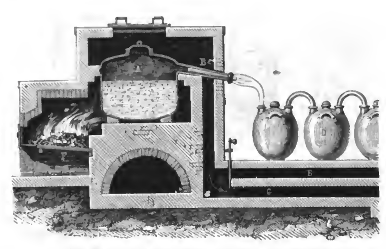


Fig. 68. — Préparation industrielle de l'acide azotique.

98. **Usages.** — L'acide nitrique est employé dans l'industrie pour la préparation de l'acide sulfurique et de l'acide oxalique; pour la gravure sur cuivre, la fabrication du coton-poudre et la teinture en jaune sur soie et sur laine.

GAZ AMMONIAC (AzH^3).

Équiv. en poids = 17
Équiv. en vol. = 4^{vol}

Le gaz ammoniac est connu depuis fort longtemps. Berthollet le premier a fixé sa composition en 1785.

99. **Propriétés physiques.** — Ce gaz est incolore, d'une odeur vive et piquante, qui provoque les larmes; il a une saveur âcre.

Sa densité est 0,596; par suite un litre de ce gaz pèse $1^{gr},293 \times 0,596 = 0^{gr},770$.

Il est excessivement soluble dans l'eau, qui en dissout 1000 fois son volume à 0°. Sa solubilité est un peu moindre à 20°, elle est nulle à 60°.

On démontre son extrême solubilité en ouvrant sur l'eau une éprouvette qui a été remplie de ce gaz sur la cuve à mercure. L'eau se précipite dans l'éprouvette, et en brise souvent le sommet.

On peut encore faire l'expérience de la manière suivante : Un flacon A (*fig.* 69) rempli d'ammoniac sur la cuve à mercure a été bouché par un bon bouchon de liége traversé par un tube de verre effilé et fermé à son extrémité inférieure. Si on casse cette extrémité sous l'eau, on voit le liquide se précipiter dans le flacon en formant une gerbe et le remplir en quelques instants. — Un morceau de glace, mis dans une éprouvette pleine d'ammoniac, y fond rapidement, en absorbant le gaz.

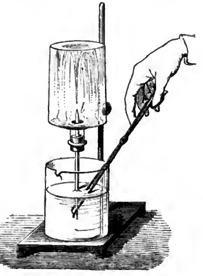


Fig. 69. — Solubilité du gaz ammoniac.

La dissolution du gaz dans l'eau est appelée ***ammoniaque*** ou ***alcali volatil***. Sa densité est 0,855. Cette dissolution est un caustique très-énergique ; elle attaque la peau.

Le gaz ammoniac est absorbé par le chlorure d'argent, qui en peut dissoudre 320 fois son volume ; il est également absorbé par le charbon, qui en prend 90 fois son volume, et par le chlorure de calcium.

Il a été liquéfié par M. Bussy à — 40°. Faraday l'a liquéfié à 0° sous la pression de 6 ½ atmosphères. Pour répéter cette expérience, on place du chlorure d'argent dans un tube en verre vert recourbé et on lui fait absorber du gaz ammoniac, jusqu'à saturation. Le tube est ensuite fermé à la lampe et chauffé à 40° à l'une de ses extrémités, pendant que l'autre plonge dans la glace (*fig.* 70). Le gaz se liquéfie peu à peu, par suite de la pression qu'il exerce sur lui-même. On peut le solidifier en faisant évaporer ce liquide dans le vide ; on obtient ainsi à — 80° une masse cristalline incolore, d'une faible odeur.



Fig. 70.
Liquéfaction du gaz ammoniac.

100. Propriétés chimiques. — Le gaz ammoniac est décomposé

par la chaleur. Pour que sa décomposition soit complète, on le fait passer à travers un tube de porcelaine rempli de fragments de même matière et chauffé au rouge vif. Il est également décomposé par une longue série d'étincelles électriques.

Une bougie allumée s'éteint dans le gaz ammoniac.

Si l'on mélange 3 volumes d'oxygène et 4 volumes d'ammoniac dans un flacon, une bougie allumée ou une étincelle électrique déterminent une forte détonation.

$$\mathrm{Az\,H^3 + 3\,O = 3\,HO, + Az.}$$

Dans cette réaction il se produit en même temps un peu d'azotate d'ammoniaque.

L'oxygène passant avec de l'ammoniac sur de la mousse de platine produit de l'acide azotique :

$$\mathrm{Az\,H^3 + 8\,O = Az\,O^5,\ 3\,HO.}$$

Le chlore décompose l'ammoniaque en produisant de l'azote et du chlorhydrate d'ammoniaque

$$\mathrm{4\,Az\,H^3 + 3\,Cl = Az + 3\,(Az\,H^3,\ H\,Cl).}$$

S'il y avait excès de chlore, il se formerait un gaz extrêmement détonant qu'on appelle le *chlorure d'azote*.

Le brôme et l'iode agissent d'une manière analogue.

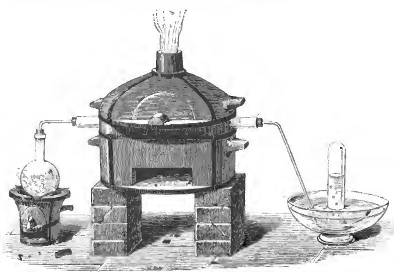


Fig. 71. — Décomposition de l'ammoniac par le fer.

Quand on opère sur l'iode on ajoute d'ordinaire un excès de ce corps et l'on obtient de l'iodure d'azote beaucoup moins dangereux que le

chlorure d'azote, mais qui cependant détone encore par la plus légère agitation.

Le carbone chauffé au rouge dans un tube de porcelaine décompose un courant de gaz ammoniac en donnant de l'hydrogène et de l'acide cyanhydrique qui se combine avec l'ammoniac non décomposé :

$$2\,AzH^3 + 2\,C = AzH^3,\ HC^2Az + 2\,H.$$

Le fer et le cuivre chauffés au rouge vif (*fig.* 71) décomposent le gaz ammoniac en ses éléments et deviennent cassants. Le platine opère la même décomposition sans être altéré.

L'ammoniaque, dissolution de gaz ammoniac, possède les propriétés des dissolutions alcalines, elle verdit le sirop de violettes, et dissout le chlorure d'argent et l'oxyde de cuivre. L'*eau céleste* s'obtient en versant un excès d'ammoniaque dans une dissolution d'un sel de cuivre.

Versée sur de la planure de cuivre, au contact de l'air elle en absorbe l'oxygène et donne de l'azotite de cuivre qui dissout la cellulose, la soie, etc. On peut utiliser cette réaction de l'ammoniaque sur le cuivre pour extraire l'azote de l'air.

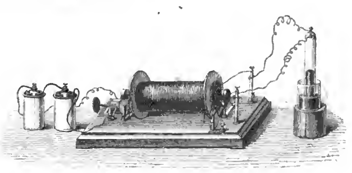


Fig. 72. — Analyse du gaz ammoniac.

101. **Analyse.** — Pour faire l'analyse du gaz ammoniac on décompose 50 volumes de ce gaz dans l'eudiomètre à mercure, par une très-longue série d'étincelles (*fig.* 72). Le volume devient double ; on ajoute alors 50 volumes d'oxygène et on excite l'étincelle. Il ne reste après l'explosion que 37 vol 5. Il a par conséquent disparu 112 vol 5, formés de 75 volumes d'hydrogène et de 37 vol 5 d'oxygène. On en conclut que le gaz ammoniac est formé de 25 d'azote et de 75 d'hydrogène condensés en 50 volumes.

102. **Production.**—On trouve de l'ammoniaque ou plutôt de l'azotate d'ammoniaque dans les pluies d'orage ; on en rencontre dans la rouille que produit le fer en s'oxydant au contact de l'air humide; enfin il s'en produit dans l'action du fer et du zinc sur l'acide azotique très-étendu.

dans la décomposition des matières organiques azotées et dans la distillation de la houille pour le gaz de l'éclairage.

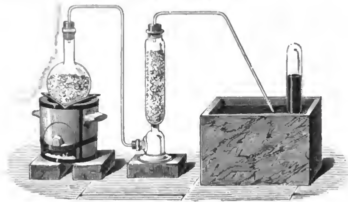


Fig. 73. — Préparation du gaz ammoniac.

103. **Préparation.** — On prépare le gaz ammoniac en chauffant dans un ballon de verre un mélange intime de chlorhydrate d'ammoniaque et de chaux vive (*fig.* 73). La chaux met l'ammoniac en liberté et forme avec l'acide chlorhydrique du chlorure de calcium et de l'eau :

$$AzH^3, HCl + CaO = AzH^3 + CaCl + HO.$$

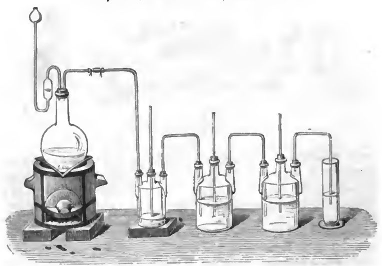


Fig. 74. — Préparation de la dissolution ammoniacale.

Pour dessécher le gaz ammoniac, on le fait passer sur de la chaux vive ou sur des fragments de potasse.

La dissolution ammoniacale s'obtient en faisant arriver le gaz dans un appareil de Woulf, dont les flacons (*fig.* 74) sont à moitié remplis d'eau. Il faut avoir soin de faire plonger jusqu'au fond les tubes qui amènent le gaz, parce que la dissolution, étant plus légère que l'eau, monte à la surface, tandis que le liquide moins saturé redescend.

On emploie ordinairement pour cette préparation du sulfate d'ammoniaque et de la chaux éteinte :

$$AzH^3, HO, SO^3 + CaO = AzH^3 + CaO, SO^3 + HO.$$

Dans l'industrie, on prépare cette dissolution en chauffant avec de la chaux les eaux ammoniacales qui se condensent dans la distillation de la houille ou qui proviennent de l'épuration du gaz de l'éclairage.

104. **Usages**. — L'ammoniaque est employée dans les laboratoires comme réactif alcalin; elle est utilisée en médecine contre les piqûres de guêpe, de cousin, contre les morsures de vipère, etc.

CHAPITRE IV

Phosphore et ses composés. — Arsenic.

PHOSPHORE (Ph).

Équiv. en poids = 31
Équiv. en vol. = 1vol

Le phosphore a été découvert en 1669 par Brandt, alchimiste de Hambourg, qui le retira de l'urine. Son procédé, tenu secret, fut retrouvé en 1674 par Henckel, puis publié en France. Scheele et Gahn donnèrent en 1769 le procédé que l'on suit encore aujourd'hui pour le retirer des os.

105. **Propriétés physiques**. — Le phosphore est un corps solide, d'une odeur qui rappelle un peu celle de l'ail ; il est incolore ou légèrement ambré, transparent, flexible quand il vient d'être fondu, facilement rayé par l'ongle.

Sa densité est 1,83. — Il est lumineux dans l'obscurité.

Il fond à 44°,2, et bout à 290°. On peut le distiller dans un courant d'hydrogène ou d'azote.

Insoluble dans l'eau, il se dissout un peu dans l'alcool et dans l'éther; il est très-soluble dans le sulfure de carbone et dans les huiles essentielles. Conservé sous l'eau, il se recouvre d'une poussière blanche par suite d'une transformation isomérique

106. **Modifications moléculaires**. — Le phosphore est sus-

ceptible de plusieurs modifications isomériques : quand il est très-pur et qu'après l'avoir chauffé à 70° on le refroidit brusquement il devient noir.

Il se transforme en *phosphore rouge* ou *phosphore amorphe* quand on l'expose à la lumière solaire ou à l'action de la chaleur. La lumière ne produit cette modification qu'à la surface des bâtons de phosphore. Dans le procédé de M. Schrœtter, qui donne le phosphore rouge en grande abondance, on maintient le phosphore pendant plusieurs jours en vase clos, à une température de 230° à 240°. Le phosphore non modifié s'enlève par le sulfure de carbone.

107. **Tableau comparatif des propriétés du phosphore rouge et du phosphore ordinaire :**

PHOSPHORE ROUGE.	PHOSPHORE ORDINAIRE.
Couleur rouge violacée,	Couleur ambrée,
Amorphe,	Cristallisé en décaèdres rhomboïdaux
Densité = 1,96,	Densité = 1,83,
Insoluble dans le sulfure de carbone,	Soluble dans le sulfure de carbone,
Non phosphorescent,	Phosphorescent,
A peu près inaltérable à l'air,	S'altère à l'air,
Inflammable à 260°,	Inflammable à 60°,
Se combine avec le soufre à 230°,	Se combine avec le soufre à 111°,
Attaqué très-faiblement à chaud par l'acide azotique,	Attaqué violemment par l'acide azotique,
Non délétère.	Poison dangereux.

108. **Action des différents corps.** — *Action de l'air.* — Dans l'air sec et froid, le phosphore donne de l'acide phosphoreux anhydre. Dans l'air humide, il donne encore de l'acide phosphoreux, mais avec un peu d'acide phosphorique, et des fumées blanches lumineuses dans l'obscurité, que M. Schönbein a reconnues être de l'azotite d'ammoniaque.

Fig. 75.
Combustion du phosphore dans le chlore.

Action de l'oxygène. — Dans l'oxygène pur, à la pression ordinaire, il ne se produit rien au-dessous de 30°. Si l'on diminue la pression, il se forme de l'acide phosphoreux. Au-dessus de 30°, le phosphore s'enflamme dans l'oxygène, et donne l'acide phosphorique.

Action du chlore. — Le phosphore, plongé dans un flacon plein de chlore (*fig.* 75), s'enflamme spontanément ; il forme alors un protochlorure, $PhCl^3$, ou un perchlorure, $PhCl^5$, suivant que le phosphore ou le chlore sont en excès.

Le *brôme* et l'*iode* agissent d'une manière analogue.

L'*acide azotique* concentré est violemment attaqué par le phosphore, et donne de l'acide phosphorique, $PhO^5, 3HO$, en même temps qu'un mélange d'azote et de protoxyde d'azote. Quand l'acide est étendu, la réaction se fait tranquillement, et l'on a de l'acide phosphorique et du bioxyde d'azote :

$$3Ph + 5AzO^5, Aq = 3PhO^5, Aq + 5AzO^2.$$

109. **Phosphorescence.** — La phosphorescence est une propriété complétement distincte de l'oxydation. Elle consiste en une sorte de lueur bleuâtre, que le phosphore présente, non-seulement dans l'air, mais encore dans l'azote, dans l'hydrogène, et même dans le vide barométrique, elle dure jusqu'à ce que l'espace soit saturé de vapeur de phosphore. L'azote est celui de tous les gaz où elle est le plus remarquable.

Le phosphore ne luit pas dans l'oxygène à la pression ordinaire, au-dessous de 30°, bien qu'il s'y réduise en vapeur ; mais le mélange d'oxygène et de vapeur de phosphore, introduit dans l'azote ou dans l'air, y devient phosphorescent. Un grand nombre de corps, comme le bicarbure d'hydrogène, l'alcool, l'éther, l'essence de térébenthine, mêlés à l'air, empêchent le phosphore d'y devenir phosphorescent, et même de s'y oxyder.

110. **État naturel.** — Le phosphore existe dans la nature principalement à l'état de phosphate de chaux, que l'agriculture utilise, et à l'état de phosphate de fer, de plomb ou de magnésie. On en trouve dans les os, le cerveau, l'urine, et dans la laitance des poissons.

111. **Préparation.** — On prend des os de bœuf ou de mouton, que l'on a préalablement calcinés, pour détruire la matière organique ; ils sont formés d'environ 80 de phosphate de chaux, 17 de carbonate de chaux et 3 de sable et argile. Ces os pulvérisés sont traités à froid par leur poids d'acide sulfurique concentré, additionné de 5 fois son poids d'eau. Au bout de 24 heures, tout le carbonate a été décomposé et le phosphate tribasique de chaux est devenu phosphate acide en vertu de la réaction suivante :

$$3CaO, PhO^5 + 2SO^3HO = CaO, 2HO, PhO^5 + 2CaOSO^3.$$

Le sulfate se sépare par filtration. On mêle le phosphate acide, concentré à consistance sirupeuse, avec 1/5 de son poids de charbon, et on porte le tout au rouge sombre. Il se dégage pendant cette opération de l'eau et de l'acide sulfureux provenant de l'action du charbon sur l'acide sulfurique en excès. La masse sèche est alors placée dans une cornue en grès qu'on chauffe au rouge vif (*fig.* 76). Il se dégage de la vapeur d'eau, puis de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone provenant de l'action de l'eau *basique* sur le charbon, et enfin un peu de phosphure d'hydrogène au moment où le phosphore commence à se volatiliser. La réaction est la suivante :

$$3(CaO, PhO^5) + 10C = 10CO + 3CaO, PhO^5 + 2Ph.$$

Les os donnent environ 8 à 9 pour 100 de phosphore; on peut, dans des opérations bien conduites, en retirer jusqu'à 11 pour 100, c'est-à-dire à peu près la quantité théorique qui résulte de l'équation précédente.

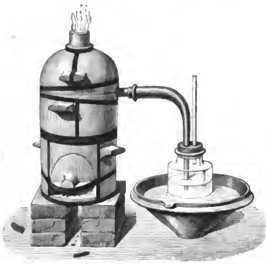


Fig. 76. — Préparation du phosphore.

Pour séparer le phosphore ainsi obtenu du charbon et des autres impuretés entraînées, on le met dans une peau de chamois et on le force par pression à filtrer sous l'eau à 50°.

Pour l'avoir en bâtons, on le fait pénétrer par aspiration dans des tubes de verre légèrement coniques, puis on le refroidit brusquement. Le phosphore solide sort alors facilement du tube.

112. **Usages.** — On fabrique annuellement en France 60,000 kilogr. de phosphore ordinaire et 2,000 kilogr. de phosphore amorphe.

La fabrication des allumettes en emploie 36,000 kilogr.

Allumettes à phosphore ordinaire. — Les allumettes, préalablement soufrées par un bout, sont légèrement plongées dans la composition suivante:

Phosphore	25
Colle forte	20
Eau	45
Sable fin	20
Ocre	5
Vermillon ou bleu de Prusse	1

Les allumettes ainsi préparées sont ensuite desséchées à l'étuve.

On remplace quelquefois par de la stéarine le soufre qui donne en brûlant de l'acide sulfureux, à odeur désagréable; il faut alors ajouter un peu de chlorate de potasse à la pâte pour faciliter la combustion.

Les allumettes à *phosphore amorphe*, préalablement soufrées, sont recouvertes d'une pâte formée de :

Chlorate de potasse	6
Sulfure d'antimoine	3
Colle forte	1

Le carton sur lequel on doit les frotter, et qui seul est phosphoré, est enduit de la composition suivante :

Phosphore amorphe	10
Bioxyde de manganèse ou sulfure d'antimoine. . .	8
Colle forte.	6

COMPOSÉS OXYGÉNÉS DU PHOSPHORE.

113. Le phosphore forme avec l'oxygène trois composés bien définis :

L'acide phosphorique. . . . . PhO^5.
L'acide phosphoreux. . . . PhO^3.
L'acide hypophosphoreux. . . PhO

L'acide *hypophosphoreux* se produit quand on chauffe du phosphore avec un alcali (116).

L'acide *phosphoreux* prend naissance quand le phosphore se trouve exposé à froid à l'action de l'oxygène ou de l'air.

Ces deux acides sont très-avides d'oxygène; ils réduisent un grand nombre d'oxydes et passent à l'état d'acide phosphorique.

L'acide phosphorique est le seul que nous devons étudier avec détail.

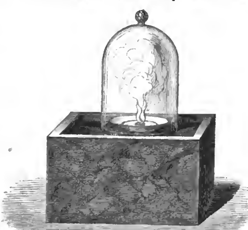
ACIDE PHOSPHORIQUE : PhO^5.

Équiv. en poids = 71
Équiv. en vol. = »

Il existe à l'état anhydre ou combiné avec 1, 2 ou 3 équivalents d'eau.

114. Anhydre, il est blanc, pulvérulent, semblable à de la neige. Il se volatilise au rouge sombre.

Il est très-avide d'eau et produit au contact de ce liquide un sifflement intense. Une fois hydraté, il garde toujours au moins un équivalent d'eau. On l'emploie principalement pour dessécher le gaz.


Fig. 77.

115. **Préparation.** — Dans les laboratoires, on en prépare de petites quantités en recouvrant d'une cloche

bien sèche un fragment de phosphore enflammé contenu dans une coupelle de terre (*fig.* 77).

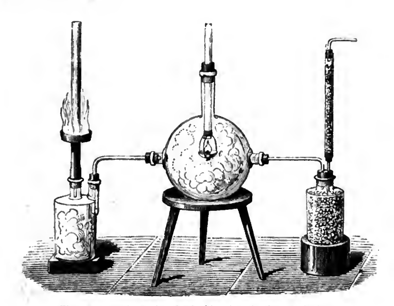


Fig. 78. — Préparation de l'acide phosphorique anhydre.

Pour l'obtenir en grand, on emploie un ballon ou une cloche à deux tubulures latérales (*fig.* 78). Par l'une des tubulures, pénètre de l'air bien desséché, par l'autre l'acide phosphorique entraîné va se condenser dans un flacon sec et froid. Le phosphore est introduit par un tube de verre qui porte à sa partie inférieure un petit creuset. On l'enflamme à l'aide d'un fer rouge.

COMBINAISONS DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE AVEC L'EAU.

116. L'acide phosphorique forme avec l'eau trois composés qui ne sont pas simplement des états d'hydratation différents d'un même acide, mais trois acides complétement distincts par leurs propriétés et par la composition des sels qu'ils peuvent produire ; ce sont :

L'acide *phosphorique monohydraté* ou acide *métaphosphorique :*

$$PhO^5 HO ;$$

L'acide *phosphorique bihydraté* ou acide *pyrophosphorique :*

$$PhO^5 2 HO ;$$

L'acide *phosphorique trihydraté* ou acide *phosphorique ordinaire :*

$$Ph\,O^5\,3\,HO.$$

Le premier de ces acides ne forme qu'une seule série de sels, les *métaphosphates*, dont la formule est :

$$RO,\ Ph\,O^5.$$

Le second forme des sels appelés *pyrophosphates* dont la formule est :

$$2\,RO\,Ph\,O^5$$
$$\text{ou}\quad RO,\ HO\,Ph\,O^5.$$

L'équivalent d'eau joue ici le rôle de base.

L'acide phosphorique ordinaire forme des sels appelés *phosphates ordinaires* et dont la formule est toujours l'une des trois suivantes :

$$3\,RO\,Ph\,O^5;$$
$$2\,RO,\ HO,\ Ph\,O^5$$
$$\text{ou}\quad RO,\ 2\,HO,\ Ph\,O^5.$$

Un ou deux équivalents d'eau peuvent dans ce cas jouer le rôle de base.

On distingue ces trois acides à l'aide des réactions suivantes :

L'acide *métaphosphorique* coagule l'albumine et donne un précipité blanc avec le chlorure de baryum ; tandis que les deux autres acides ne coagulent pas l'albumine et ne donnent pas de précipité avec les sels de baryte.

Pour distinguer ces deux derniers, on a recours à ce caractère que les *phosphates ordinaires* précipitent en jaune les sels d'argent, tandis que les *pyrophosphates* donnent dans les mêmes conditions un précipité blanc.

117. Préparation de l'acide métaphosphorique. — On prépare l'acide *métaphosphorique :* 1° en mettant l'acide anhydre en contact avec de l'eau ; 2° en calcinant au rouge le phosphate d'ammoniaque du commerce :

$$2\,Az\,H^4\,O,\ HO,\ Ph\,O^5 = HO\,Ph\,O^5 + 2\,Az,\ H^3 + 2\,HO.$$

L'acide métaphosphorique est incolore, incristallisable, il a l'aspect vitreux et est très-soluble dans l'eau.

118. Acide pyrophosphorique. — Pour préparer l'acide *pyrophosphorique*, on traite par l'acide sulfhydrique le pyrophosphate de plomb :

$$2\,Pb\,O,\ Ph\,O^5 + 2\,HS = 2\,Pb\,S + 2\,HO\,Ph\,O^5\ ^*.$$

L'acide ainsi obtenu cristallise par évaporation, quoique difficilement.

119. Acide phosphorique ordinaire. — L'acide *phosphorique*

* Pour obtenir ce pyrophosphate, on calcine d'abord le phosphate de soude du commerce ($2\,Na\,O,\ HO\,PhO^5 + 24\,HO$), puis on redissout le pyrophosphate formé $2\,Na\,OPhO^5$, et on le traite par l'acétate de plomb. Il se forme de l'acétate de soude soluble et du pyrophosphate insoluble.

ordinaire s'obtient en chauffant dans une cornue de verre du phosphore avec six à sept fois son poids d'acide azotique à 20° Baumé (*fig.* 79). Il se produit de l'acide phosphorique qui reste dans la cornue, et du bioxyde d'azote qui entraîne un peu d'acide azotique. Ce liquide entraîné est de temps en temps reversé dans la cornue. On chauffe ainsi jusqu'à ce que tout le phosphore ait disparu. On évapore le produit d'abord dans un vase de verre, puis dans une capsule de platine jusqu'au rouge sombre.

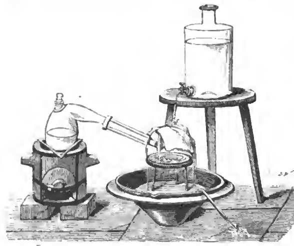


Fig. 79. — Préparation de l'acide phosphorique ordinaire.

Cet acide est très-soluble dans l'eau, il cristallise facilement en prismes droits, à base rhombe. Chauffé au rouge vif, il abandonne 2 équivalents d'eau et devient vitreux.

120. **Synthèse.** — Pour déterminer la composition de l'acide anhydre, on fait passer un courant d'oxygène sur un poids connu de phosphore amorphe, et en pesant l'acide phosphorique obtenu, on trouve que 31 grammes de phosphore donnent 71 grammes d'acide phosphorique.

Pour déterminer la quantité d'eau contenue dans un acide phosphorique hydraté, on en chauffe un poids connu avec un excès d'oxyde de plomb. L'augmentation de poids de l'oxyde donne le poids de l'acide anhydre ; le poids d'eau s'obtient par différence.

PHOSPHURES D'HYDROGÈNE.

Le phosphore forme avec l'hydrogène trois composés :

Un phosphure gazeux, PhH^3,
Un phosphure liquide, PhH^2,
Un phosphure solide, Ph^2H.

PHOSPHURE GAZEUX (PhH^3).

Équiv. en poids = 34
Équiv. en vol. = 4^{vol}

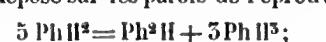
Ce gaz a été découvert en 1783 par Gengembre.

121. **Propriétés physiques.** — C'est un gaz incolore d'une odeur alliacée. Sa densité est 1,185; par suite, un litre pèse 1,540. Il est peu soluble dans l'eau, il se dissout mieux dans l'alcool et dans l'éther.

122. **Propriétés chimiques.** — Ce gaz pur n'est inflammable à l'air qu'à 100°. Il s'enflamme spontanément à la température ordinaire quand il contient un peu de vapeur de phosphure liquide (*fig.* 80), et donne alors une couronne de fumée blanche d'acide phosphorique.

$$PhH^3 + 8O = PhO^5 + 3HO.$$

Le gaz spontanément inflammable à la température ordinaire perd avec le temps cette propriété par suite de la décomposition du phosphure liquide en phosphure gazeux et phosphure solide jaune; ce dernier se dépose sur les parois de l'éprouvette,



$$5\,PhH^2 = Ph^2H + 3\,PhH^3;$$



Fig. 80. — Phosphure d'hydrogène.

des traces d'huile de naphte, d'acide chlorhydrique, d'hydrogène sulfuré ou de gaz oléfiant déterminent immédiatement ce dédoublement.

Le phosphure d'hydrogène gazeux réduit les dissolutions des sels de cuivre et d'argent. Cette propriété permet de séparer le phosphure qui se trouverait mélangé avec de l'hydrogène.

123. **Analyse.** — On chauffe du cuivre métallique dans une cloche courbe contenant 100 volumes de phosphure gazeux; le volume augmente et devient égal à 150.

Or si de la densité du phosphure gazeux.	1,184
on retranche $1\frac{1}{2}$ fois la densité de l'hydrogène.	0,103
il reste $\frac{1}{4}$ de la densité de vapeur du phosphore.	1.081

On en conclut que 4 volumes de phosphure contiennent 6 volumes d'hydrogène et 1 volume de vapeur de phosphore.

Le gaz phosphure d'hydrogène forme avec l'acide iodhydrique des composés analogues à ceux que forme l'ammoniaque.

124. **Préparation**. — On prépare le phosphure d'hydrogène *spontanément inflammable :*

1° En chauffant dans un ballon de verre des boulettes faites avec de la chaux éteinte, un peu d'eau et un petit fragment de phosphore (*fig.* 81). Le ballon doit être presque plein de ces boulettes; on achève de le remplir avec de la chaux éteinte. Les premières bulles s'enflamment dans le ballon. On attend que l'inflammation ne se produise plus qu'à l'extrémité du tube abducteur, on le plonge alors dans l'eau et on recueille le phosphure dans des éprouvettes; la réaction est la suivante :

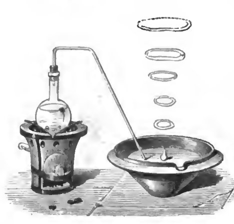


Fig. 81.
Préparation du phosphure d'hydrogène gazeux spontanément inflammable.

$$4\,Ph + 3\,CaO + 9\,HO = PhH^3 + 3\,(CaO, 2\,HO\,PhO).$$

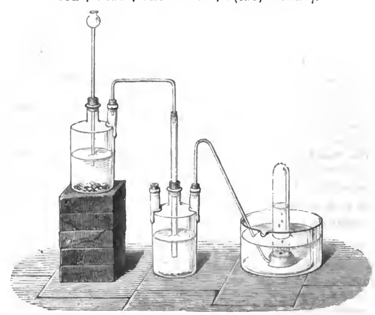


Fig. 82.—Préparation du phosphure d'hydrogène non spontanément inflammable.

Il se produit toujours en même temps un peu d'hydrogène libre, grâce

à ce que les hypophosphites se transforment en phosphates au contact de l'eau et des bases à une température peu élevée, comme l'indique la formule suivante:

$$CaO\,2\,HO, PhO + 2\,CaO, HO = 3\,CaO, PhO^5 + 4\,H.$$

2° On prépare encore ce gaz en mettant du *phosphure de chaux* au contact de l'eau, soit dans un verre ordinaire, soit dans un flacon à deux tubulures. Ce *phosphure de chaux* est un mélange de phosphate de chaux et de phosphure de calcium, $Ph\,Ca^2$. On l'obtient en faisant passer de la vapeur de phosphore sur de la chaux vive chauffée au rouge dans un tube de verre ou dans un creuset.

On prépare le phosphure *non spontanément inflammable* en mettant ce même phosphure de chaux en contact, non plus seulement avec de l'eau, mais avec de l'acide chlorhydrique dans un flacon à deux tubulures, (*fig.* 82), dont l'une est munie d'un tube à dégagement, et l'autre porte un tube large par lequel on projette des fragments de phosphure. Un courant d'acide carbonique a d'abord servi à chasser l'air du flacon.

La réaction donne du phosphure liquide qui se décompose au contact de l'acide chlorhydrique en phosphure gazeux et phosphure solide:

$$Ph\,Ca^2 + 2\,HCl = Ph\,H^2 + 2\,CaCl.$$
$$5\,Ph\,H^2 = 3\,Ph\,H^3 + Ph^2H.$$

ARSENIC (As).

Équiv. en poids = 75
Équiv. en vol. = 1^vol

Nous n'étudierons ici l'arsenic et ses principaux composés que pour montrer les analogies que ce corps présente avec le phosphore.

125. Propriétés physiques. — C'est un corps solide, gris d'acier, cassant, cristallisant en rhomboèdres. Sa densité est 5,63. Il se volatilise au rouge sombre sans entrer en fusion. La densité de sa vapeur est 10,37.

126. Propriétés chimiques. — L'arsenic perd son éclat et noircit au contact de l'air à la température ordinaire. A une température élevée, il se combine avec l'oxygène, et donne de l'acide arsénieux, $As\,O^3$. — Projeté en poudre dans le chlore, il brûle avec éclat en donnant $AsCl^3$.

L'acide azotique le transforme d'abord en acide arsénieux AsO^3, puis en acide arsénique, $As\,O^5$.

Projeté sur des charbons, il se volatilise en répandant une odeur d'ail caractéristique.

127. Acide arsénieux. — C'est un corps solide blanc, très-vénéneux; il perfore les parois de l'estomac. — Pour combattre l'empoi-

sonnement il faut d'abord provoquer des vomissements, de manière à expulser la plus grande partie du poison. On fait ensuite prendre du sesquioxyde de fer ou de la magnésie caustique en suspension dans l'eau. Ces bases neutralisent l'acide en formant avec lui des sels insolubles.

On peut déceler la présence de l'arsenic par l'action de l'hydrogène naissant, qui décompose l'acide arsénieux, et s'unissant à l'arsenic réduit donne de l'arséniure d'hydrogène.

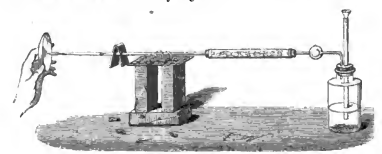


Fig. 83. — Appareil de Marsh.

Ce gaz se produit chaque fois que, dans un appareil à hydrogène on verse un peu d'acide arsénieux ou d'acide arsénique. Si on fait alors passer le gaz qui se dégage à travers un tube effilé à son extrémité (*appareil de Marsh*, *fig.* 83), on voit, en chauffant une partie du tube, apparaître un peu au delà un ***anneau miroitant d'arsenic*** métallique. Si on allume le gaz à l'extrémité du tube, on y reconnaît la présence de l'arsenic en écrasant la flamme avec une soucoupe de porcelaine celle-ci se recouvre de taches noires brillantes.

CHAPITRE V

Soufre et ses composés. — Sélénium. — Tellure.

SOUFRE (S).

Équiv. en poids = 16
Équiv. en vol. = 1re

128. **Propriétés physiques.** — Le soufre est un corps solide, d'une couleur jaune citron, insipide et inodore; il acquiert par le frottement l'odeur particulière des corps électrisés.

Il est très-mauvais conducteur de la chaleur et de l'électricité : la

chaleur seule de la main suffit pour produire dans le soufre une dilatation des parties superficielles qui occasionne des ruptures intérieures accompagnées de craquements. — Ces craquements deviennent bien plus sensibles si on plonge brusquement le soufre dans de l'eau chaude.

La densité de ce corps est 2,05. Il est insoluble dans l'eau, peu soluble dans l'alcool et dans l'éther, très-soluble dans la benzine, l'essence de térébenthine et les huiles essentielles. Son meilleur dissolvant est le sulfure de carbone.

Il fond à 44°,2 et entre en ébullition à 440°.

129. **Divers états moléculaires du soufre solide**. — Le soufre est *dimorphe*. Il peut cristalliser en octaèdres appartenant au système du prisme *droit* à base rectangle, on l'appelle alors soufre *octaédrique* (*fig.* 84) ou en prismes *obliques* à base rectangle, c'est alors le soufre *prismatique* (*fig.* 85).

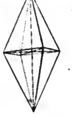


Fig. 84.
Soufre octaédrique.

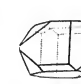


Fig. 85.
Soufre prismatique.

En abandonnant à l'évaporation spontanée une dissolution de soufre dans le sulfure de carbone, on obtient des *octaèdres* jaunes, transparents, inaltérables à la température ordinaire et identiques à ceux qu'on trouve dans la nature.

On obtient le soufre *prismatique* en faisant cristalliser par refroidissement vers 111° le soufre fondu. Pour avoir des cristaux bien nets, il faut avoir la précaution de *décanter* la partie du soufre restée encore liquide au moment où la surface libre commence à se solidifier. Les parois sont alors tapissées de longues aiguilles transparentes et légèrement flexibles.

Abandonnées à la température ordinaire, ces aiguilles s'altèrent peu à peu ; elles perdent leur transparence, deviennent opaques et friables, ce ne sont plus que des chapelets d'octaèdres. On peut rendre cette transformation très-rapide en humectant les aiguilles avec un peu de sulfure de carbone; on constate alors qu'elle est accompagné d'un dégagement de chaleur.

Les cristaux octaédriques maintenus quelque temps à une température un peu inférieure à 111° perdent à leur tour leur transparence, et se transforment en soufre prismatique. Il y a donc deux états d'équilibre moléculaire différents qui correspondent, l'un à la température ordinaire, l'autre à la température de 111°.

A ces variations de forme correspondent des variations de densité : Le soufre prismatique a pour densité 1,97, et le soufre octaédrique, 2,05.

Soufre amorphe. — Le soufre peut aussi se présenter *amorphe*, comme l'a reconnu M. Ch. Sainte-Claire Deville; il est alors insoluble dans le sulfure de carbone. Le soufre en canon et le soufre en fleur contiennent toujours une certaine quantité de ce soufre *amorphe*. Il s'en produit chaque fois que le soufre est refroidi brusquement.

130. **États moléculaires du soufre fondu.** — Les propriétés du soufre à l'état liquide varient avec la température : à 111° il est très-fluide, transparent, d'un jaune clair. Si on continue à le chauffer, il se colore à partir d'environ 150°, en devenant brun et de plus en plus visqueux. Vers 200°, sa viscosité est telle qu'on peut retourner le vase qui le contient sans en renverser. Au-dessus de cette température, il redevient peu à peu fluide, tout en gardant sa coloration. Enfin il entre en ébullition à 440°.

Refroidi lentement, il repasse par les mêmes états de couleur et de fluidité; si, au contraire, on coule dans de l'eau froide du soufre à 250°, on obtient le *soufre mou*.

Le soufre ainsi trempé est élastique comme du caoutchouc. Chauffé à 100°, il dégage assez de chaleur pour porter de 100° à 110° la température d'un thermomètre.

Le soufre mou devient peu à peu dur et cassant en repassant à l'état de soufre ordinaire. On rend le soufre mou d'une manière plus durable en y introduisant une très-petite quantité de chlore ou d'iode; il est alors complétement insoluble dans le sulfure de carbone. Le soufre mou ordinaire contient toujours aussi un peu de soufre amorphe insoluble.

131. **Densité de la vapeur.** — Le soufre en vapeur présente encore des propriétés singulières : sa densité, prise à 500° par M. Dumas, est 6,654. MM. H. Sainte-Claire Deville et Troost, en reprenant l'expérience à des températures plus élevées, ont constaté qu'elle diminue peu à peu pour devenir enfin constante et égale à 2,2, à partir d'environ 850.

132. **Propriétés chimiques.** — Le soufre chauffé au contact de l'air s'enflamme vers 250°, en donnant de l'acide sulfureux, reconnaissable à son odeur vive et pénétrante. Il est donc combustible vis-à-vis de l'oxygène, il l'est de même vis-à-vis du chlore, du brôme et de l'iode. Il joue, au contraire, le rôle de comburant vis-à-vis du phosphore, du carbone, de l'hydrogène et des métaux. Il se conduit vis-à-vis de ces corps exactement comme l'oxygène dont nous l'avons rapproché (17). En effet, le carbone brûle dans la vapeur de soufre en donnant de l'*acide sulfocarbonique* (sulfure de carbone), CS^2, analogue à l'acide carbonique, CO^2.

Le fer et le cuivre brûlent également avec chaleur et lumière dans la vapeur de soufre. Le fer divisé et humide se combine même à froid avec le soufre comme avec l'oxygène.

133. **État naturel.** — Le soufre est très-répandu dans la nature

il existe à l'état natif dans le voisinage des anciens volcans (solfatares de la Sicile), soit pur et cristallin, soit mélangé de matières terreuses.

On le trouve en grande abondance dans les sulfures métalliques et les sulfates.

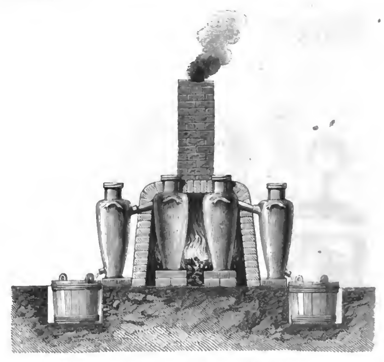


Fig. 86. — Extraction du soufre brut.

134. **Extraction. Soufre brut.** — Le soufre mélangé de matières terreuses est soumis sur place à une première distillation qui donne le *soufre brut*. Cette opération s'effectue dans des pots de terre rangés sur deux files dans un long fourneau de galère (*fig.* 86). Ces pots communiquent par une tubulure latérale inclinée avec d'autres vases semblables placés à l'extérieur, et munis, à leur partie inférieure, d'un petit tube par lequel le soufre condensé et liquide coule dans des baquets pleins d'eau froide. On remplit les creusets de soufre mélangé de terre, et après avoir fermé l'ouverture supérieure, on chauffe jusqu'à ce que tout le soufre ait passé à la distillation.

Le soufre brut ainsi obtenu est loin d'être pur. Il contient encore quelquefois jusqu'à 10 pour 100 de matières terreuses.

135. **Raffinage.** — On raffine le soufre à l'aide de l'appareil sui-

vant (*fig.* 87). Une cornue cylindrique horizontale en fonte A, exposée à la chaleur directe du foyer, reçoit le soufre fondu d'une chaudière supérieure C chauffée par les gaz qui se rendent dans la cheminée. C'est dans cette chaudière qu'on place le soufre brut. Dès qu'il fond, il coule par un tube latéral dans la cornue inférieure, où il est bientôt porté à l'ébullition. Cette disposition évite l'inflammation qui se produirait si on était obligé d'ouvrir la cornue pour y renouveler le soufre.

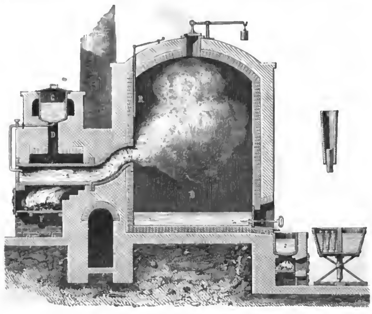


Fig. 87. — Raffinage du soufre.

La vapeur se rend dans une grande chambre en maçonnerie B dont le sol légèrement incliné vient aboutir à des ouvertures qu'on peut déboucher à volonté. Une grande porte percée dans une des parois latérales, et une cheminée munie d'une soupape permettent de refroidir la chambre à un moment donné, en y faisant passer un rapide courant d'air.

La vapeur en arrivant dans la chambre close et froide, s'y condense en poussière fine qu'on appelle fleur de soufre. On n'a que ce produit, si on arrête l'opération avant que les parois de la chambre se soient élevées à 111°, par suite de l'absorption de la chaleur cédée par le soufre. Mais si on continue l'opération, le soufre ne se solidifie plus, il se réunit à l'état liquide sur le sol incliné. En ouvrant une petite rigole, on le reçoit dans une chaudière extérieure. Ce soufre, coulé ensuite dans des moules coniques en sapin légèrement humides, donne le *soufre en canon*.

On obtient encore du soufre par la calcination des pyrites (FeS^2) en vase clos :

$$3\,FeS^2 = 2\,S + Fe^3S^4.$$

Ce traitement des pyrites s'est généralisé depuis l'élévation du prix du soufre de Sicile.

136. **Usages.** — On consomme annuellement en France 26 millions de kilogrammes de soufre. Le soufre brut sert à fabriquer l'acide sulfurique et l'acide sulfureux. Le soufre raffiné entre dans la composition de la poudre; on l'emploie encore pour préparer les allumettes, pour sceller le fer dans la pierre, pour prendre des empreintes de médailles et pour *soufrer les vignes*. On l'utilise en médecine contre certaines maladies de la peau.

COMPOSÉS OXYGÉNÉS DU SOUFRE.

Les deux principaux composés du soufre et de l'oxygène sont :

L'acide sulfureux. . . . . SO^2
Et l'acide sulfurique . . . . SO^3

ACIDE SULFUREUX (SO^2).

Équiv. en poids = 32
Équiv. en vol. = 2^{vol}

Stahl a, le premier, indiqué les propriétés caractéristiques de ce gaz, connu, d'ailleurs, en même temps que le soufre. Sa composition a été déterminée par Lavoisier.

137. **Propriétés physiques.** — C'est un gaz incolore, d'une odeur vive et pénétrante; il provoque la toux. Sa densité est 2,234.

Il est soluble dans l'eau, qui en dissout 50 fois son volume à la température ordinaire.

On le liquéfie facilement en le refroidissant. Il suffit de faire arriver le gaz, bien sec, dans un tube en U, entouré d'un mélange de 2 parties de glace pour 1 partie de sel marin (*fig.* 88).

L'acide ainsi liquéfié est un liquide incolore, très-fluide. Sa densité est 1,45. Il bout à — 10°, et se solidifie à — 75°. On peut l'employer pour produire de grands froids : quand il s'évapore sur la boule d'un thermomètre à alcool, il abaisse la température à — 57°. Son évaporation dans le vide l'amène à — 68. M. Bussy a utilisé ce froid pour liquéfier le chlore, le cyanogène et l'ammoniaque. On arrive au même résultat, comme l'ont montré MM. Drion et Loir, en faisant passer un courant d'air très-rapide dans l'acide sulfureux liquide, au milieu duquel plonge

un tube de verre mince, où l'on fait arriver le gaz à liquéfier. — Quand on met du mercure dans ce tube mince, on le voit se solidifier au bout de quelques minutes.

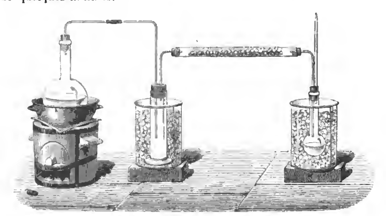


Fig. 88. — Liquéfaction de l'acide sulfureux.

138. **Propriétés chimiques.** — L'acide sulfureux est indécomposable par la chaleur. Il rougit fortement la teinture de tournesol et éteint les corps en combustion.

139. **Action de l'oxygène.** — L'oxygène sec n'a d'action à aucune température sur l'acide sulfureux sec dans les circonstances ordinaires; mais si l'on fait passer les deux gaz sur de l'éponge de platine légèrement chauffée, il se produit de l'acide sulfurique anhydre.

En présence de l'eau, les deux gaz se combinent peu à peu ; aussi la dissolution d'acide sulfureux doit-elle être faite avec de l'eau privée d'air par ébullition, et conservée dans des flacons pleins et bien bouchés. Si l'eau est aérée, ou s'il y a de l'air au-dessus de la dissolution, il se forme de l'acide sulfurique; l'existence de cet acide se reconnait au moyen d'un sel soluble de baryte qui donne avec l'acide sulfurique un précipité blanc de sulfate de baryte *insoluble;* il ne se serait rien produit dans le cas où la liqueur étendue n'aurait contenu que de l'acide sulfureux.

Cette affinité de l'acide sulfureux pour l'oxygène en présence de l'eau constitue la propriété la plus importante de cet acide; c'est sur elle que sont fondées ses principales applications. Elle explique comment il peut non-seulement s'emparer de l'oxygène libre, mais encore l'enlever à ses combinaisons peu stables.

140. **Action de l'acide azotique.** — Grâce à son affinité pour l'oxygène, l'acide sulfureux décompose l'acide azotique en donnant de l'acide sulfurique et de l'acide hypoazotique :

$$SO^2 + AzO^5, HO = SO^3\ HO + AzO^4.$$

Il suffit de verser quelques gouttes d'acide azotique dans une éprouvette renversée et pleine de gaz acide sulfureux pour voir apparaître les vapeurs rutilantes.

Si l'on avait fait réagir l'acide azotique sur une dissolution d'acide sulfureux, on aurait eu de l'acide sulfurique et du bioxyde d'azote, parce que l'eau décompose l'acide hypoazotique :

$$3\,SO^2 + AzO^5,\,n\,HO = AzO^2 + 3\,SO^3,\,n\,HO.$$

141. **Action du chlore.** — L'action du chlore se rattache à celle de l'oxygène; en effet, quand on fait réagir le chlore sur l'acide sulfureux en présence de l'eau, celle-ci est décomposée, grâce à l'affinité du chlore pour l'hydrogène et à celle de l'acide sulfureux pour l'oxygène; il se forme de l'acide sulfurique et de l'acide chlorhydrique :

$$SO^2 + Cl + n\,HO = HCl + SO^3,\,(n-1)\,HO.$$

Le brôme et l'iode donnent des réactions analogues.

142. **Action de l'hydrogène.** — Bien que l'acide sulfureux soit un corps réducteur il peut cependant être réduit à son tour par certains corps très-avides d'oxygène : l'hydrogène, passant avec un courant d'acide sulfureux dans un tube de porcelaine chauffé au rouge, le décompose et donne de l'eau et du soufre :

$$SO^2 + 2\,H = 2\,HO + S.$$

A l'état naissant, l'hydrogène réagit à froid : si l'on introduit de l'acide sulfureux dans un appareil à hydrogène, le dégagement se ralentit un peu, puis le gaz qui se dégage entraîne de l'acide sulfhydrique, comme on peut le reconnaître en plongeant le tube abducteur dans une dissolution d'acétate de plomb.

La réaction qui a produit cet acide est la suivante :

$$SO^2 + 3\,H = 2\,HO + HS.$$

143. **Action sur les matières colorantes.** — Les propriétés réductrices de l'acide sulfureux lui permettent d'altérer beaucoup de matières colorantes en s'emparant de leur oxygène. Les violettes, les roses blanchissent dans l'acide sulfureux. La matière colorante n'est pas toujours détruite, elle peut reparaître sous l'influence de l'oxygène de l'air si l'action du gaz n'a pas été trop prolongée.

144. **Composition de l'acide sulfureux.** — On fait la synthèse de l'acide sulfureux en faisant brûler un fragment de soufre dans un ballon plein d'oxygène et reposant sur la cuve à mercure. Il se forme de l'acide sulfureux sans qu'il y ait changement dans le volume du gaz. On en conclut que l'acide sulfureux contient son volume d'oxygène.

Si de la densité du gaz acide sulfureux.	2,234
on retranche la densité de l'oxygène.	1,106
il reste la demi-densité de vapeur de soufre.	1,128

Donc l'acide sulfureux contient 2 volumes d'oxygène et 1 volume de vapeur de soufre, condensés en 2 volumes.

145. Préparation. — On prépare l'acide sulfureux dans les laboratoires en chauffant légèrement dans un ballon de verre (*fig.* 89) de l'acide sulfurique concentré et du mercure. Le mercure s'empare d'un tiers de l'oxygène de l'acide sulfurique et donne de l'oxyde de mercure, qui s'unit à l'acide non décomposé :

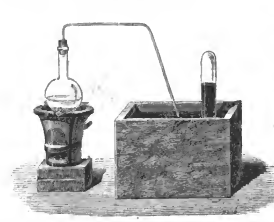


Fig. 89.
Préparation de l'acide sulfureux.

$$Hg + 2\,SO^3, HO = SO^2 + HgO, SO^3 + 2\,HO.$$

Ce gaz, étant très-soluble dans l'eau, ne peut être recueilli que sur le mercure.

On peut, dans la préparation, remplacer le mercure par de la tournure de cuivre; mais, dans ce cas, on doit enlever les charbons dès que la réaction commence, sans quoi il se produit un boursouflement capable de faire passer la matière par le tube abducteur. La réaction est, d'ailleurs, semblable à la précédente :

$$Cu + 2\,SO^3, HO = SO^2 + CuO, SO^3 + 2\,HO.$$

Quand on veut obtenir l'acide en dissolution, on remplace économiquement le métal par du charbon, qui, réagissant sur l'acide sulfurique, donne de l'acide sulfureux et de l'acide carbonique :

$$2\,SO^3, HO + C = 2\,SO^2 + CO^2 + 2\,HO.$$

Le mélange passe dans un flacon laveur (*fig.* 90) contenant un peu d'eau, qui retient l'acide sulfurique entraîné, puis il se rend dans les flacons d'un appareil de Woulf; l'acide sulfureux, plus soluble, chasse l'acide carbonique.

Dans l'industrie on prépare en général l'acide sulfureux par la combustion du soufre au contact de l'air. L'acide se trouve alors mêlé avec de

l'azote et un excès d'air. On l'obtient encore dans certaines usines à acide sulfurique par le grillage des pyrites. L'emploi des pyrites tend à se généraliser parce que l'acide sulfureux ainsi obtenu revient moins cher que l'acide obtenu par la combustion directe du soufre.

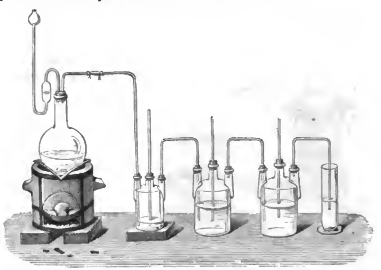


Fig. 90. — Préparation de l'acide sulfureux en dissolution.

146. **Usages.** — L'acide sulfureux est employé pour blanchir la laine et la soie. Les matières, préalablement lavées, sont suspendues encore humides dans de grandes chambres où l'on enflamme du soufre sur une large plaque de tôle : l'acide sulfureux se dissout dans l'eau qui humecte les filaments, et y détruit la matière colorante. L'exposition à l'air et un nouveau lavage font ensuite disparaître l'excès d'acide.

Les taches de fruits rouges sont également enlevées par l'acide sulfureux : il suffit de placer la tache humide au-dessus du sommet ouvert d'un cornet de papier sous lequel on brûle du soufre.

Les fumigations d'acide sulfureux détruisent l'insecte qui cause la *gale*.

En brûlant des mèches soufrées dans un tonneau, on y prévient la fermentation du vin et des boissons alcooliques.

ACIDE SULFURIQUE (SO^3).

Équiv. en poids = 40
Équiv. en vol. = 2^{vol}

Il a été découvert au quinzième siècle par le moine Basile Valentin Lavoisier démontra le premier qu'il est formé de soufre et d'oxygène

On lui a donné les noms d'*huile de vitriol* et d'acide *vitriolique*, qui rappellent son apparence et son origine, car on l'a retiré pendant longtemps du sulfate de fer (*vitriol vert*).

Nous aurons à examiner successivement l'acide sulfurique *anhydre*, l'acide *monohydraté* ou acide ordinaire, et enfin l'acide *fumant* ou acide *de Nordhausen*, qui n'est qu'une dissolution d'acide anhydre dans l'acide ordinaire.

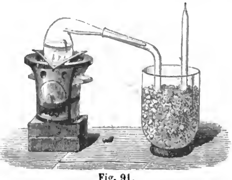


Fig. 91.
Préparation de l'acide sulfurique anhydre.

147. Acide anhydre. Propriétés. — C'est un corps solide, blanc, cristallisé en longues aiguilles soyeuses et brillantes comme de l'amiante. Il fond à 18° et se volatilise entre 30 et 35°. Sa densité à l'état solide est 1,97. La densité de sa vapeur est 2,76.

Il répand d'abondantes fumées qui résultent de la condensation de l'acide sulfurique hydraté produit par la combinaison de l'acide anhydre avec la vapeur d'eau de l'atmosphère. L'acide anhydre projeté dans l'eau s'y dissout en faisant entendre un bruit analogue à celui d'un fer rouge plongé dans ce liquide.

148. Préparation de l'acide anhydre. — On le prépare en chauffant légèrement de l'acide de Nordhausen dans une petite cornue de verre, dont le col pénètre dans un tube entouré d'un mélange réfrigérant (*fig.* 91). Il se dégage bientôt d'épaisses fumées blanches qui vont se condenser et cristalliser dans le tube refroidi. Pour conserver cet acide il suffit de fermer le tube à la lampe.

Dans cette préparation, l'acide anhydre, qui bout à 35°, s'est simplement séparé de l'acide hydraté, bouillant à 325°, dans lequel il se trouvait dissous.

On obtient encore de l'acide anhydre, ainsi que nous l'avons déjà dit, en faisant passer un mélange d'oxygène et d'acide sulfureux secs sur de la mousse de platine légèrement chauffée.

149. Acide de Nordhausen. — Cet acide, appelé aussi *acide de Saxe*, est un liquide oléagineux, qui répand à l'air d'abondantes fumées. Il cristallise à la température ordinaire, et quand les cristaux ont été bien égouttés, ils ne fondent plus qu'à 35°. Leur formule est

$$2\,SO^3 + HO = SO^3 + SO^3HO.$$

On l'utilise en teinture, parce qu'il dissout beaucoup plus d'indigo que l'acide ordinaire.

Pour le préparer on emploie le sulfate de fer :

$$FeO\,SO^3 + 7\,HO.$$

Ce sel calciné perd la plus grande partie de son eau ; il peut alors être distillé dans de petites cornues de terre qui communiquent avec des récipients de même forme (*fig.* 92). Ces cornues sont disposées sur trois rangs dans un fourneau long. Il se dégage d'abord de l'acide sulfureux, puis un mélange d'acide sulfurique anhydre et d'acide hydraté qui se condensent dans le récipient.

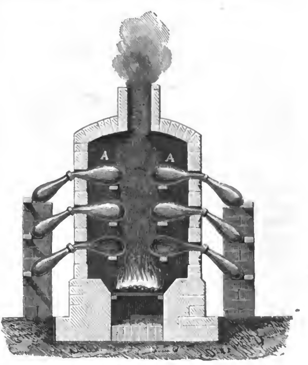


Fig. 92. — Préparation de l'acide de Saxe.

Dans cette opération, le sulfate de fer déshydraté donne d'abord, sous l'influence de la chaleur, de l'acide sulfureux et du sulfate de sesquioxyde de fer, grâce à l'affinité du protoxyde de fer pour l'oxygène.

$$2\,FeO\,SO^3 = SO^2 + Fe^2\,O^3, SO^3.$$

Le sulfate de sesquioxyde se décompose à son tour et donne de l'acide anhydre, qui se dégage en même temps que de l'acide hydraté provenant des portions de sulfate de fer qui, dans une calcination en grand, n'ont pas été toutes également déshydratées.

ACIDE SULFURIQUE ORDINAIRE (SO^3HO).

Équiv. en poids = 49
Équiv. en vol. = 4^{vol}

150. **Propriétés physiques.** — L'acide sulfurique ordinaire est un liquide incolore, inodore, d'une consistance oléagineuse. Sa densité est 1,84, à la température ordinaire.

Il se congèle vers — 34° en beaux cristaux incolores; il bout à 325°.

Pour le distiller, on le place dans une cornue de verre communiquant avec un ballon refroidi. Cette distillation exige quelques précautions; car à cause de la viscosité du liquide et de son adhérence pour le verre, les bulles de vapeur ne prennent naissance que lorsque leur force élastique est de beaucoup supérieure à la pression atmosphérique. Une fois formées, ces bulles se gonflent rapidement et projettent violemment le liquide qu'elles traversent, de sorte que celui-ci en retombant produit un choc capable de briser la cornue. On évite ces soubresauts à l'aide de quelques fils de platine qui, ayant pour l'acide moins d'adhérence que le verre, laissent dégager de petites bulles de vapeur sur toute leur surface et permettent une ébullition plus régulière. On réussit encore mieux en chauffant la cornue latéralement à l'aide d'une grille annulaire (*fig.* 93). Un dôme en tôle recouvrant la panse de la cornue empêche les vapeurs de se refroidir.

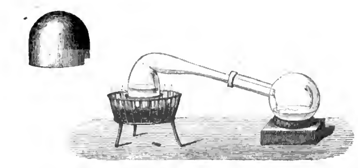


Fig. 93. — Distillation de l'acide sulfurique.

151. **Propriétés chimiques.** — L'acide sulfurique est décomposé par la chaleur rouge en oxygène, en acide sulfureux et eau; on utilise cette réaction pour préparer l'oxygène (40).

C'est un acide très-énergique. Étendu de mille fois son poids d'eau, il rougit encore la teinture de tournesol.

152. **Action de l'hydrogène, du carbone, du soufre et du phosphore.** — L'hydrogène et tous les corps très-avides d'oxygène

décomposent l'acide sulfurique à une température plus ou moins élevée.

Si on fait passer des vapeurs d'acide avec de l'hydrogène dans un tube de porcelaine chauffé au rouge, il se produit de l'eau et de l'acide sulfureux ou du soufre, suivant la quantité d'hydrogène.

Quand l'acide est en excès, on a :

$$SO^3HO + H = 2HO + SO^2.$$

Si c'est l'hydrogène :

$$SO^3HO + 3H = 4HO + S.$$

Enfin si la température est inférieure à celle où l'acide sulfhydrique se décompose, on a :

$$SO^3HO + 4H = 4HO + HS.$$

A la température d'environ 300°, le *carbone* donne avec l'acide sulfurique de l'acide sulfureux et de l'acide carbonique :

$$2SO^3HO + C = 2SO^2 + CO^2 + 2HO.$$

On profite de cette réaction pour préparer la dissolution d'acide sulfureux.

153. **Action des métaux.** — L'or et le platine sont sans aotion sur l'acide sulfurique.

L'argent, le mercure, le cuivre donnent avec l'acide sulfurique concentré de l'acide sulfureux (149) et un oxyde qui s'unit à la portion d'acide non décomposé :

$$Cu + 2SO^3HO = SO^2 + CuO\,SO^3 + 2HO.$$

Ces métaux n'ont pas d'action sur l'acide étendu.

Le fer, le zinc et les métaux qui décomposent l'eau à froid donnent avec l'acide concentré, de l'acide sulfureux et de l'hydrogène, qui, par son action sur ce dernier acide, produit du soufre ou de l'acide sulfhydrique. Avec l'acide étendu, ces métaux ne donnent que de l'hydrogène (48).

154. **Action de l'eau.** — L'eau a une grande affinité pour l'acide sulfurique. Quand on mêle ces deux liquides, il se produit une élévation de température qui peut dépasser 100°. Il faut verser l'acide lentement dans l'eau et agiter constamment pour éviter toute projection. En versant l'eau dans l'acide, on déterminerait de véritables explosions.

Au contact de l'acide sulfurique, la glace fond rapidement. Il y a dans ce cas, à la fois un dégagement de chaleur dû à la combinaison, et une absorption de chaleur résultant de la fusion de la glace. Suivant que l'un ou l'autre de ces deux effets l'emporte, il y a élévation ou abaissement de température; ainsi, 1 kilog. de glace et 4 kilog. d'acide élèvent la température à 100°; on obtient, au contraire, un froid de — 20° en mêlant 4 parties de glace avec une partie d'acide.

C'est par suite de son affinité pour l'eau que l'acide sulfurique carbo-

nise le bois, détruit les tissus organiques et produit, quand il est introduit dans l'estomac, une altération trop rapide pour que les alcalis eux-mêmes puissent le combattre.

Dans les combinaisons de l'acide avec l'eau il y a toujours *contraction :* le volume de l'acide étendu est moindre que la somme des volumes des deux liquides. Le maximum de contraction correspond à la combinaison de 1 équivalent d'acide monohydraté avec 2 équivalents d'eau :

$$SO^3HO + 2HO = SO^3, 3HO.$$

C'est pour cette raison qu'on regarde $SO^3 3HO$ comme un hydrate défini et non pas un simple mélange.

On obtient un autre hydrate défini

$$SO^3, 2HO$$

en mêlant 1 équivalent d'acide monohydraté avec 1 équivalent d'eau. En effet ce dernier corps refroidi cristallise en prismes hexagonaux fusibles à 8°,5.

155. **Composition.** — Lorsqu'on fait passer des vapeurs d'acide sulfurique anhydre dans un tube de porcelaine chauffé au rouge, on recueille un mélange de gaz acide sulfureux et d'oxygène.

Une dissolution de potasse réduit le volume gazeux au tiers. Il y avait donc 2 volumes d'acide sulfureux pour 1 volume d'oxygène.

Or, si à la densité de l'acide sulfureux. . . .	2,234
On ajoute la demi-densité de l'oxygène. . . .	0,553
On obtient la densité de l'acide sulfurique. . .	2,787

2 volumes d'acide sulfurique sont donc formés de 2 volumes d'acide sulfureux et 1 volume d'oxygène, ou, ce qui revient au même, de 1 volume de vapeur de soufre et 3 volumes d'oxygène, car l'acide sulfureux contient son volume d'oxygène.

Pour doser l'eau contenue dans l'acide sulfurique, il suffit de verser un poids connu de cet acide sur un excès connu d'oxyde de plomb; on calcine, et la perte de poids représente le poids de l'eau.

On trouve, en opérant de cette façon, que 49 grammes d'acide concentré contiennent 9 grammes d'eau et 40 d'acide anhydre.

156. **État naturel.** — L'acide sulfurique se trouve à l'état libre dans les eaux qui avoisinent les volcans. Le Rio-Vinagre, qui, en Amérique, descend de la chaîne des Andes, contient plus d'un centième d'acide sulfurique.

Cet acide se trouve très-abondamment dans la nature à l'état de combinaison avec la chaux, la baryte, la magnésie, etc.

157. **Préparation.** — Pour obtenir l'acide sulfurique, on suroxyde l'acide sulfureux, en faisant réagir sur lui le bioxyde d'azote en présence

de la vapeur d'eau et de l'air. Le bioxyde s'emparant de l'oxygène de l'air, se transforme en acide hypoazotique :

$$AzO^2 + 2O = AzO^4.$$

Cet acide, à son tour, se convertit, sous l'influence de l'eau, en acide azotique et en bioxyde d'azote :

$$3AzO^4 + n\,HO = 2AzO^5, n\,HO + AzO^2.$$

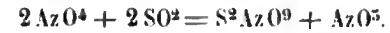
Enfin l'acide azotique est décomposé par l'acide sulfureux :

$$SO^2 + AzO^5, HO = SO^3, HO + AzO^4$$

L'acide hypoazotique produit dans cette dernière réaction se retransforme, en présence de l'eau, en acide azotique et bioxyde d'azote, qui, au contact de l'air et de la vapeur, reproduit avec l'acide sulfureux la même réaction que d'abord.

Comme ce bioxyde d'azote ne prend en définitive l'oxygène de l'air que pour le céder ensuite à l'acide sulfureux ; on voit qu'une quantité limitée de ce gaz peut servir à la production d'une quantité illimitée d'acide sulfurique, à condition que l'air et l'eau se renouvellent suffisamment.

Lorsque l'eau est en quantité insuffisante, l'acide hypoazotique ne se convertit pas en acide azotique, il se combine avec l'acide sulfureux, et forme les cristaux dits des chambres de plomb.



$$2AzO^4 + 2SO^2 = S^2AzO^9 + AzO^3.$$

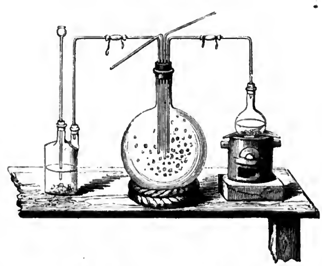


Fig. 94. — Réactions qui donnent naissance à l'acide sulfurique.

On met ces diverses réactions en évidence à l'aide d'un grand ballon

de verre (*fig.* 94) contenant de l'eau à sa partie inférieure, et fermé par un bouchon qui laisse passer quatre tubes, dont trois descendent jusqu'au milieu du ballon. L'un de ces tubes communique, avec un appareil où se produit l'acide sulfureux, l'autre avec un flacon qui fournit du bioxyde d'azote. Des deux autres tubes, le plus long sert à insuffler l'air nécessaire aux réactions, l'autre laisse échapper les gaz chassés par l'insufflation.

Le bioxyde d'azote, arrivant dans le ballon, y donne des vapeurs rutilantes, qui disparaissent au contact de l'acide sulfureux et de l'eau *préalablement chauffée*. Si l'on insuffle de l'air, la coloration se reproduit pour disparaître bientôt. On peut constater la formation de l'acide sulfurique en versant dans l'eau du ballon un sel soluble de baryte, qui donne un précipité blanc de sulfate de baryte.

Si on n'avait pas chauffé l'eau, les parois du ballon se seraient couvertes des cristaux mentionnés plus haut.

Le contact de l'eau suffit pour les faire disparaître.

Leur production indique que l'opération marche mal ; il faut donc l'éviter, car elle entraîne la perte de produits nitrés.

158. **Fabrication dans les chambres de plomb.** — Dans l'industrie, le ballon de verre est remplacé par de grandes chambres, dont les parois sont garnies de lames de plomb soudées entre elles. On y fait arriver de l'acide sulfureux provenant, soit de la combustion directe du soufre, soit du grillage des pyrites. Le bioxyde d'azote est fourni par l'acide azotique; enfin on fait arriver de l'air et de la vapeur d'eau.

La *figure* 95 représente une coupe générale des appareils.

A,A sont deux fourneaux accouplés, dans lesquels on brûle du soufre sur une large plaque de tôle. La chaleur dégagée est employée à échauffer l'eau des chaudières qui, par un système de tubes *c,d,* distribuent la vapeur dans les différentes parties de l'appareil. Le gaz acide sulfureux, entraînant de l'air, passe par de larges tuyaux B,B dans un *tambour* en plomb C où sont disposées des tablettes sur lesquelles coule de l'acide sulfurique chargé de produits nitreux, dont l'origine sera indiquée plus loin. Les réactions commencent immédiatement; elles se continuent dans la première chambre C′ appelée le *dénitrificateur*, où passent, en sortant du tambour, l'acide sulfureux et les gaz nitrés, ainsi qu'un excès d'air. Cette chambre reçoit un jet de vapeur d'eau, qui facilite les combinaisons. Les gaz se rendent ensuite dans une deuxième chambre D, où ils se trouvent en présence d'une double cascade E d'acide azotique tombant en nappe mince et présentant par suite une grande surface de contact à l'acide sulfureux. L'acide sulfurique formé, après avoir dissous l'acide azotique non décomposé et un peu de vapeur d'acide hypoazotique, se rend dans la première chambre C′, où les produits azotés qu'il contient subissent l'action de l'acide sulfureux, ce qui justifie le nom de *dénitrificateur* qu'on a donné à cette première chambre.

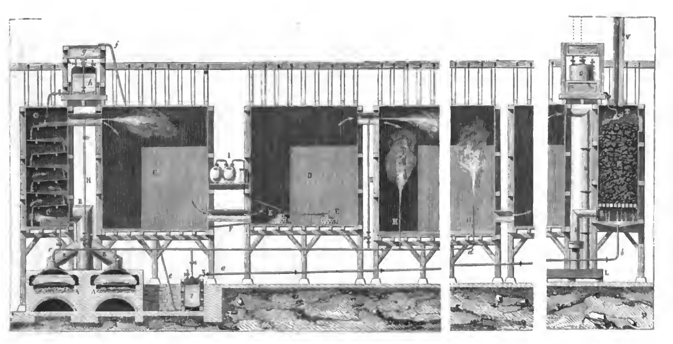


Fig. 95. — Préparation industrielle de l'acide sulfurique.

L'acide sulfureux, l'excès d'air et l'acide hypoazotique provenant de la décomposition de l'acide azotique se rendent ensemble dans la *grande chambre* H,H, qui reçoit plusieurs jets de vapeur d'eau. C'est dans cette chambre que les gaz mélangés et échauffés réagissent de la manière la plus complète; c'est là que se forme la plus grande partie de l'acide sulfurique. Les réactions se terminent dans une dernière chambre, destinée surtout à condenser les produits qui résultent des précédentes réactions. La condensation se complète dans un réfrigérant L. Quant aux vapeurs nitreuses qui échappent à la condensation, on les arrête en faisant passer les gaz dans un dernier *tambour* en plomb R rempli de coke, sur lequel tombent de minces filets d'acide sulfurique venant d'un réservoir supérieur O. Les gaz qui sortent de ce tambour sont formés d'azote entraînant de très-petites quantités de produits nitrés; ils s'échappent par une cheminée d'appel. Quant à l'acide chargé de produits nitrés, il descend, par un tube *b*, dans un réservoir *i*. Dès que ce réservoir est plein, on ferme le robinet *r*, et, si l'on ouvre le robinet *r'*, la vapeur, exerçant sa pression, force l'acide à monter dans le réservoir supérieur *g*, d'où il se divise sur les tablettes du premier tambour.

L'acide qui sort des chambres marque environ 50° à l'aréomètre de Baumé. On le concentre dans des bassines de plomb jusqu'à ce qu'il marque 60° à l'aréomètre. On ne peut aller plus loin, car le plomb serait attaqué trop vivement; la concentration s'achève dans de grandes cornues de verre ou de platine jusqu'à ce qu'il marque 66°. Sa densité est alors 1,842. C'est dans cet état qu'on le livre au commerce.

159. **Purification.** — L'acide sulfurique du commerce contient toujours des matières étrangères, dont le poids peut s'élever jusqu'à 2 ou 3 pour 100 de celui de l'acide. Ce sont principalement du sulfate de plomb provenant de l'attaque des bassines d'évaporation, et des produits azotés.

On manifeste la présence du plomb en faisant passer un courant d'acide sulfhydrique dans l'acide étendu de son poids d'eau. Il se forme alors un sulfure de plomb noir.

Les produits azotés se reconnaissent à la coloration qu'ils donnent au sulfate de fer. Cette coloration, due à l'absorption du bioxyde d'azote, est rose s'il y a seulement des traces de produits nitrés, elle devient brune si les produits sont en plus grande quantité.

En ajoutant à l'acide un peu de sulfate d'ammoniaque, on réduit l'acide azotique ou hypoazotique en azote et protoxyde d'azote, qui se dégagent à une température peu élevée.

On sépare l'acide sulfurique par distillation du sulfate de plomb et de l'excès de sulfate d'ammoniaque.

Lorsque l'acide sulfureux employé dans la préparation provient du grillage des pyrites, qui sont un peu arsénicales, il se forme un

peu d'acide arsénieux, qui, au contact de l'acide azotique, passe à l'état d'acide arsénique.

La présence de ce composé dans l'acide sulfurique se reconnaît à l'aide de l'appareil de Marsh (124). On l'élimine en faisant passer dans l'acide étendu de son poids d'eau un courant d'acide sulfhydrique et abandonnant le vase, bien fermé, pendant vingt-quatre heures; le sulfure d'arsenic se précipite alors avec le sulfure de plomb.

160. **Usages.**— L'acide sulfurique a de nombreux usages. On en consomme annuellement en France environ 70 millions de kilogrammes. Il sert à fabriquer le sulfate de soude et, partant, la soude artificielle des savonniers, verriers, etc., le sulfate de cuivre et les aluns. On l'emploie pour préparer les acides azotique et chlorhydrique, pour fabriquer les bougies stéariques, le sucre de fécule; pour dissoudre l'indigo, pour affiner l'or et l'argent, etc., etc.

ACIDE SULFHYDRIQUE.

Équiv. en poids = 17
Équiv. en vol. = 2^{vol}

L'acide sulfhydrique a été découvert par Scheele, qui en détermina la nature et la composition. On l'appelle aussi *hydrogène sulfuré* et quelquefois acide *hydrosulfurique.*

161. **Propriétés physiques.** — C'est un gaz incolore, d'une odeur fétide rappelant celle des œufs pourris.

Sa densité est 1,1912; par suite, un litre de ce gaz pèse 1,1912 × 1,293 = 1^{gr},640.

L'eau en dissout environ 3 fois son volume à la température ordinaire; l'alcool en dissout 5 à 6 volumes.

On peut le liquéfier par une pression de 16 atmosphères à 0°. Il suffit, pour cela, de mettre dans un tube en verre vert, qu'on ferme ensuite à la lampe, du bisulfure d'hydrogène. Ce corps se décompose spontanément en soufre et acide sulfhydrique. Le gaz qui se dégage acquiert une tension de plus en plus grande. Bientôt la liquéfaction se produit en même temps qu'il se forme des cristaux octaèdres de soufre. L'acide liquéfié se solidifie à —80° en cristaux transparents et incolores.

162. **Propriétés chimiques.** — C'est un acide faible qui fait passer le tournesol au rouge vineux.

L'acide sulfhydrique est décomposé par la chaleur rouge en soufre et hydrogène.

163. **Action de l'oxygène ou de l'air.** — 1° L'acide sulfhydrique

s'enflamme au contact de l'air et d'une bougie allumée (*fig.* 96); il se forme de l'eau et de l'acide sulfureux.

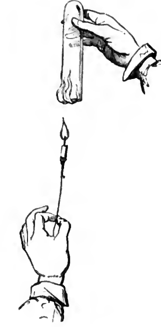


Fig. 96.

$$SH + 3O = SO^2 + HO.$$

Si l'acide est contenu dans une éprouvette étroite, et qu'on enflamme le gaz à l'ouverture, il se forme un dépôt de soufre sur les parois, parce que l'oxygène n'arrive pas en quantité suffisante. Ce dépôt ne se forme pas quand on mélange 2 volumes d'acide avec 3 volumes d'oxygène.

2° L'oxygène et l'acide secs n'ont aucune action l'un sur l'autre à la température ordinaire, mais il n'en est pas de même en présence de l'eau. On obtient alors de l'eau et un dépôt de soufre :

$$HS + O = HO + S.$$

La dissolution de l'acide sulfhydrique dans l'eau bouillie doit donc être conservée dans des flacons pleins et à l'abri de l'air.

3° En présence des corps poreux, l'oxydation est plus complète, le soufre se transforme en acide sulfurique :

$$HS + 4O = HO,SO^3.$$

M. Dumas a montré que, dans les établissements d'eaux sulfureuses, c'est à cette réaction qu'est due la carbonisation rapide des toiles qui séparent les diverses chambres de bains.

Le *chlore*, le *brôme*, l'*iode* décomposent l'acide sulfhydrique en donnant un acide avec dépôt de soufre :

$$HS + Cl = HCl + S.$$

Le *mercure*, le *cuivre*, le *plomb*, l'étain décomposent l'acide sulfhydrique et mettent l'hydrogène en liberté.

L'acide *sulfureux* n'a pas d'action sur l'acide sulfhydrique quand les deux gaz sont secs; quand ils sont humides, ils se décomposent et donnent de l'eau, du soufre et un acide qu'on appelle acide *pentathionique*.

$$5HS + 5SO^2 = 5HO + 5S + S^5O^5.$$

On utilise cette réaction pour se débarrasser de l'acide sulfhydrique dans certaines usines où il se produit en abondance. A cet effet, on grille

des pyrites qui donnent de l'acide sulfureux, et on fait réagir ce gaz en présence de l'eau sur l'acide sulfhydrique.

L'acide sulfhydrique décompose lentement l'acide sulfurique en soufre acide sulfureux et eau :

$$SO^3HO + HS = SO^2 + S + 2HO.$$

164. **Action physiologique.**—Ce gaz est un poison violent. Mélangé à l'air dans la proportion de $\frac{1}{1500}$, il suffit pour tuer un oiseau ; dans la proportion de $\frac{1}{800}$, il asphyxie un chien de forte taille ; $\frac{1}{200}$ suffit pour donner la mort à un cheval.

165. **Composition.** — Dans une cloche courbe (*fig.* 97) contenant un volume déterminé de gaz acide sulfhydrique sur le mercure, on fait passer un morceau d'étain, que l'on chauffe pendant environ 20 minutes. L'acide est décomposé, le soufre se combine avec l'étain, et l'hydrogène est mis en liberté. On constate alors que le volume du gaz n'a pas changé. Il est facile d'en déduire la composition de l'acide :



Fig. 97.
Analyse de l'acide sulfhydrique.

Si de la densité de l'acide.	1,1912
on retranche celle de l'hydrogène.	0,0692
il reste la demi-densité de vapeur du soufre. . .	1,1220

Donc 2 volumes d'acide sulfhydrique sont formés de 2 volumes d'hydrogène et de 1 volume de vapeur de soufre. On en conclut que sa formule est HS.

Cette composition rappelle celle de l'eau, qui a beaucoup d'analogie avec cet acide.

166 **État naturel.** — Ce gaz se trouve en dissolution dans les eaux minérales sulfureuses, telles que celles d'Aix-la-Chapelle, de Bagnères, de Baréges, d'Enghien, etc. Il s'en produit toutes les fois que des eaux chargées de sulfates se trouvent au contact des matières organiques qui les réduisent à l'état de sulfure, d'où l'acide carbonique chasse l'acide sulfhydrique.

Les matières organiques qui contiennent du soufre donnent facilement de l'acide sulfhydrique : tles sont les œufs, les matières fécales. Le dégagement de ce gaz frappant les vidangeurs, constitue ce qu'on appelle le *plomb*. On détruit très-facilement cet acide par l'action du chlore, employé soit à l'état gazeux, soit à l'état de chlorure de chaux.

On peut encore utiliser pour cet usage le sulfate neutre de fer qui décompose le sulfhydrate d'ammoniaque contenu dans les fosses d'aisances :

$$FeO,SO^3 + AzH^3HS = FeS + AzH^3HO,SO^3.$$

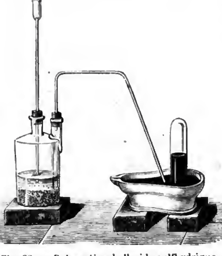


Fig. 98. — Préparation de l'acide sulfhydrique par le sulfure de fer.

167. **Préparation.** — 1° On prépare l'acide sulfhydrique en faisant réagir l'acide sulfurique étendu d'eau sur du sulfure de fer artificiel. L'appareil employé est analogue à celui qui sert à la préparation de l'hydrogène (*fig.* 98). Après avoir mis le sulfure en fragments dans le flacon rempli aux deux tiers d'eau, on verse peu à peu

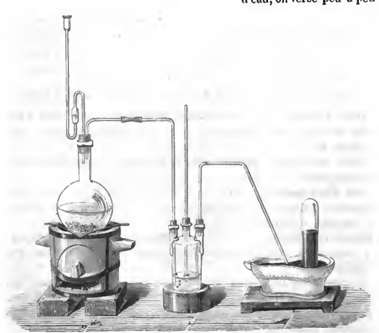


Fig. 99. — Préparation de l'acide sulfhydrique par le sulfure d'antimoine.

l'acide sulfurique. Le gaz se dégage et peut être recueilli sur le mercure

$$FeS + SO^3HO + n\,HO = HS + FeOSO^3 + n\,HO.$$

Comme le sulfure de fer a été préparé en projetant du soufre avec du fer dans un creuset porté au rouge, il n'est jamais exempt de fer métallique, aussi y a-t-il toujours un peu d'hydrogène libre mêlé à l'acide sulfhydrique obtenu.

2° On obtient le gaz parfaitement pur en chauffant dans un ballon du sulfure d'antimoine naturel avec de l'acide chlorhydrique concentré (*fig.* 99). Il se produit alors du chlorure d'antimoine et de l'acide sulfhydrique :

$$Sb^2S^3 + 3\,HCl = Sb^2Cl^3 + 3\,HS.$$

Comme le gaz peut entraîner un peu d'acide chlorhydrique, il est nécessaire de le faire passer dans un flacon laveur contenant un peu d'eau ou un sulfure alcalin.

168. **Usages.**—L'acide sulfhydrique est employé dans les laboratoires pour l'analyse des dissolutions métalliques. Certaines eaux minérales lui doivent leurs propriétés thérapeutiques.

SÉLÉNIUM (Se). — TELLURE (Te).

SÉLÉNIUM (Se).	TELLURE (Te).
Équiv. en poids = 40	Équiv. en poids = 64,5
Équiv. en vol. = 1vo	Équiv. en vol. = 1vol

Nous étudierons rapidement les propriétés principales du sélénium et du tellure. Cet aperçu suffira pour mettre en évidence l'analogie de ces corps avec le soufre.

Le sélénium, découvert en 1817 par Berzelius, se trouve constamment associé au soufre dans les sulfures métalliques.

Le tellure, découvert en 1782 par Müller de Reichenstein, et étudié par Klaproth, se trouve principalement en combinaison avec le plomb, le bismuth et l'argent.

169. **Propriétés physiques.** — Le *sélénium* et le *tellure* sont tous deux solides; mais, tandis que le premier est mauvais conducteur de la chaleur, et ressemble aux métalloïdes, comme le soufre ; le second est bon conducteur de la chaleur et doué de l'éclat métallique.

Le sélénium est noir quand on le prend en masse, il est rouge quand on l'obtient à l'état pulvérulent par précipité chimique (fleur de sélénium analogue à la fleur de soufre). Le tellure est d'un blanc grisâtre presque aussi brillant que l'argent.

La densité du sélénium solide est 4,3; celle du tellure 6,26.

Le sélénium fond à 217° et bout vers 700°. Le tellure fond vers 400° et entre en ébullition au rouge.

La densité de vapeur de ces deux corps a été déterminée par MM. H. Sainte-Claire Deville et L. Troost à la température de 1400°; elle est égale à 5,7 pour le sélénium et à 9 pour le tellure.

170. **Propriétés chimiques.** — Chauffés au contact de l'air, le sélénium et le tellure brûlent avec une flamme bleue en donnant de l'acide *sélénieux* SeO^2, ou de l'acide *tellureux* TeO^2.

L'acide nitrique et l'eau régale donnent également ces mêmes acides. L'affinité du sélénium et du tellure pour l'oxygène est donc moindre que celle du soufre, qui, avec l'acide nitrique et l'eau régale, donne de l'acide sulfurique.

Les acides *sélénique* et *tellurique* ne prennent naissance que lorsque l'oxydation a lieu en présence d'une base énergique. C'est ce qu'on réalise en chauffant ces corps avec de l'azotate de potasse. Les séléniates et les tellurates sont isomorphes avec les sulfates.

Le sélénium et le tellure forment avec l'hydrogène des acides *sélénhydrique* HSe, et *tellurhydrique* HTe, d'une odeur nauséabonde, et qui sont encore plus délétères que l'acide sulfhydrique.

CHAPITRE VI

Chlore et ses composés. — Brôme. — Iode. — Fluor.

CHLORE (Cl).

Équiv. en poids = 35,5
Équiv. en vol. = 2^{vol}

Le chlore a été découvert par Scheele en 1774. Il a été longtemps regardé comme une combinaison d'acide muriatique (chlorhydrique) et d'oxygène; aussi l'appelait-on acide *muriatique oxygéné*. En 1809, MM. Gay-Lussac et Thenard montrèrent qu'on devait le considérer comme un corps simple.

171. **Propriétés physiques.** — Le chlore est un gaz jaune verdâtre, d'une odeur forte et suffocante.

Sa densité est 2,44. Un litre de ce gaz pèse $1^{gr},293 \times 2,44 = 3^{gr},16$

Il est soluble dans l'eau. Cette solubilité atteint son maximum à 8°; l'eau en dissout alors 3 fois son volume. Ce gaz se liquéfie à —40°, sous la pression atmosphérique, ou à +15° sous la pression de 4 atmosphères. Pour réaliser cette liquéfaction, on met des cristaux d'*hydrate de chlore*

dans un tube recourbé en verre vert. Après avoir rempli l'une des branches avec ces cristaux, on ferme l'extrémité du tube. Il suffit de chauffer légèrement la partie du tube qui contient l'hydrate de chlore, pendant que l'autre extrémité plonge dans un mélange réfrigérant.

On n'a jamais pu le solidifier.

Respiré, même en petite quantité, il provoque la toux; en grande quantité, il occasionne des crachements de sang.

172. **Propriétés chimiques.** — Le chlore, étant le corps le plus électro-négatif après l'oxygène (5), n'a pas d'affinité pour lui. Aussi ne se combine-t-il jamais *directement* avec ce gaz; les composés qu'il forme avec lui sont très-instables.

173. **Action sur l'hydrogène.** — La propriété caractéristique du chlore, celle qui intervient dans presque toutes ses réactions et qui détermine ses principales applications, est son affinité pour l'hydrogène. Si l'on mélange dans un flacon, volumes égaux de chlore et d'hydrogène, il ne se produit rien dans l'obscurité; mais à la lumière diffuse, la combinaison s'effectue peu à peu. — A la lumière solaire, la combinaison est instantanée, et le flacon vole en éclats; aussi doit-on, quand on veut répéter cette expérience, avoir la précaution de diriger de loin les rayons solaires à l'aide d'un miroir sur le flacon préalablement placé à l'ombre.

Si on avait présenté une bougie à l'orifice du flacon, la combinaison se serait encore effectuée, mais moins vivement, parce que la combustion ne se propage que de proche en proche.

174. **Chlore insolé.** — Le chlore, exposé aux rayons solaires, acquiert la propriété de se combiner à l'hydrogène, même dans l'obscurité; ses affinités chimiques sont alors exaltées comme celles de l'*oxygène ozonisé*.

175. **Action sur les autres métalloïdes.** — Le *phosphore*, introduit à l'aide d'une coupelle dans un flacon plein de chlore, s'y enflamme spontanément (*fig.* 100), et produit du perchlorure de phosphore solide $PhCl^5$, si le chlore est en excès. Il produirait du protochlorure liquide si le phosphore était en excès.

Fig. 100. – Combustion du phosphore dans le chlore.

L'*arsenic* et l'*antimoine* en poudre, projetés dans un flacon plein de chlore, y brûlent avec éclat, en donnant du chlorure d'arsenic ou d'antimoine.

Le soufre, déposé au fond d'une éprouvette à pied, se combine avec le chlore, qu'on y fait arriver par un tube à dégagement. Si l'on arrête l'expérience avant que tout le soufre ait disparu, on a du protochlorure de soufre, S^2Cl. S'il y a excès de chlore, on a du bichlorure, SCl.

176. **Action des métaux.** — Le mercure se combine à la tempé-

rature ordinaire avec le chlore; aussi ne peut-on pas recueillir ce gaz sur la cuve à mercure.

Le cuivre, chauffé au rouge sombre, brûle dans un flacon de chlore en donnant du chlorure que l'on voit tomber en gouttelettes. Pour faire l'expérience, on emploie une spirale de cuivre, dont on chauffe légèrement l'extrémité inférieure, et qu'on plonge ensuite dans un flacon plein de chlore. On opère comme pour la combustion du fer dans l'oxygène.

177. **Action sur les composés hydrogénés.** — L'affinité du chlore pour l'hydrogène peut faire prévoir son action sur les composés qui contiennent ce gaz.

1° Action sur l'eau. — Le chlore décompose l'eau sous l'influence des rayons solaires;

$$Cl + HO = HCl + O.$$

Aussi la dissolution de chlore doit-elle être conservée dans des flacons noirs:

Cette décomposition se fait rapidement quand on fait passer du chlore et de la vapeur d'eau dans un tube de porcelaine chauffé au rouge.

Elle explique comment le chlore joue le rôle de corps oxydant.

La décomposition de l'eau s'effectue à la température ordinaire et en l'absence des rayons solaires quand, en même temps que le chlore, il y a un corps avide d'oxygène. C'est ainsi qu'en présence de l'acide sulfureux on a la réaction

$$SO^2 + 2\,HO + Cl = SO^3, HO + HCl.$$

On obtient des réactions analogues en faisant agir le chlore sur l'eau en présence des acides arsénieux et phosphoreux.

En présence d'un sel de protoxyde de fer, le chlore décompose également l'eau et fait passer le protoxyde de fer à l'état de sesquioxyde.

$$2\,FeO, SO^3 + HO + Cl = Fe^2O^3, 2\,SO^3 + HCl.$$

La transformation du sel se reconnait à l'aide de l'ammoniaque, qui, versé dans le sel de protoxyde, donne un précipité verdâtre, et dans les sels de sesquioxyde un précipité jaune rouille.

2° Action sur l'acide sulfhydrique. — Le chlore décompose l'acide sulfhydrique, s'empare de l'hydrogène et met le soufre en liberté:

$$HS + Cl = HCl + S.$$

Cette action est utilisée pour purifier l'air infecté d'acide sulfhydrique.

3° Action sur l'ammoniaque. — Le chlore décompose l'ammoniaque, et donne de l'azote et du chlorhydrate d'ammoniaque:

$$4\,AzH^3 + 3\,Cl = Az + 3\,AzH^3, HCl.$$

Cette réaction peut être réalisée de différentes façons : on peut, dans

un tube rempli aux $\frac{9}{10}$ d'une dissolution de chlore, verser une dissolution ammoniacale, boucher alors le tube et le renverser sur la cuve à eau : l'ammoniaque, plus légère, se mêle au chlore, et l'on voit les bulles d'azote gagner le sommet de l'éprouvette.

On peut encore faire passer un courant de chlore dans un flacon contenant une dissolution concentrée d'ammoniaque. Chaque bulle de chlore produit alors une sorte d'*éclair* en arrivant dans le liquide.

Enfin, si l'on fait passer le chlore bulle à bulle dans une éprouvette pleine de gaz ammoniac, chaque bulle produit une petite explosion

4° Action sur le phosphure d'hydrogène gazeux. — Lorsque dans une éprouvette pleine de phosphure d'hydrogène gazeux on fait passer du chlore bulle à bulle, on obtient les mêmes résultats qu'avec l'ammoniac, et l'expérience exige les mêmes précautions.

178. Action sur les oxydes. — Le chlore agit de différentes manières sur les oxydes métalliques. En présence d'une dissolution étendue de potasse, il donne du *chlorure de potassium* et de *l'hypochlorite de potasse* (eau de Javelle) :

$$2\,KO + 2\,Cl = KCl + KO, ClO.$$

Si la dissolution de potasse était concentrée, la réaction déterminerait une élévation de température, et l'hypochlorite se transformerait en *chlorure* et en *chlorate ;* on aurait la réaction suivante :

$$6\,KO + 6\,Cl = 5\,KCl + KO, ClO^5.$$

179. Action sur les matières colorantes. — Le chlore, agissant par son affinité pour l'hydrogène, décompose les matières colorantes ; une dissolution de chlore décolore le tournesol, l'indigo, l'encre. Avec ce dernier corps, il reste une tache jaune de sesquioxyde de fer, que l'on peut faire disparaître en la dissolvant par l'acide chlorhydrique.

Berthollet le premier a appliqué le chlore au blanchiment des toiles. On trempe la toile à blanchir dans une dissolution de chlore et on la lave ensuite dans une lessive alcaline qui dissout la matière brune formée sous l'influence du chlore. Cette matière brune ne se formait que très-lentement dans l'ancien procédé, où la toile devait rester exposée pendant plusieurs mois sur une prairie, d'où on la retirait de temps en temps pour la lessiver.

180. État naturel. — Le chlore existe dans la nature à l'état de chlorure de sodium, dans les mines de sel gemme et dans certaines sources salées ; à l'état de chlorure de sodium et de magnésium dans les eaux de la mer.

181. Préparation. — On l'obtient en chauffant dans un ballon de verre du bioxyde de manganèse avec de l'acide chlorhydrique (*fig.* 101). Le gaz qui se dégage passe dans un flacon laveur, où il abandonne

l'acide chlorhydrique entraîné, puis dans une éprouvette à chlorure de calcium, où il se dessèche.

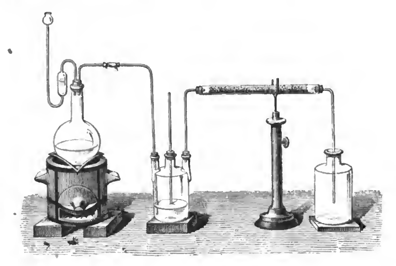


Fig. 101. — Préparation du chlore sec.

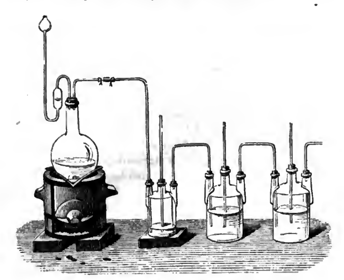


Fig. 102. — Préparation de la dissolution du chlore.

Comme on ne peut le recueillir ni sur l'eau, ni sur le mercure, on le recueille dans l'air en utilisant sa grande densité. Pour cela, on fait

arriver le tube à dégagement au fond d'un flacon. Le chlore chasse peu à peu l'air, qui est plus léger que lui, et le flacon prend la teinte verte du chlore. Il s'est formé dans cette opération du chlorure de manganèse, du chlore et de l'eau :

$$MnO^2 + 2HCl = 2HO + MnCl + Cl.$$

On peut encore préparer le chlore par l'action de l'acide sulfurique sur le bioxyde de manganèse et le chlorure de sodium :

$$NaCl + MnO^2 + 2SO^3, HO = NaO, SO^3 + MnO, SO^3 + 2HO + Cl.$$

Quand on veut avoir une dissolution de chlore, on fait passer le gaz dans une série de flacons de Woulf, à la suite desquels on a placé une dissolution alcaline pour absorber l'excès de gaz (*fig.* 102).

Cette dissolution, refroidie à 0°, laisse déposer des cristaux d'hydrate de chlore, ayant pour formule $Cl + 10HO$. Ce sont ces cristaux que l'on emploie pour préparer le chlore liquide.

182. **Usages du chlore.** — Le chlore est surtout employé pour la fabrication du chlorure de chaux destiné au blanchiment des toiles et à celui des chiffons avec lesquels on fait le papier. On l'utilise encore pour enlever les taches d'encre, pour décomposer l'acide sulfhydrique et le sulfhydrate d'ammoniaque des fosses d'aisances, ainsi que pour détruire les miasmes (Guyton de Morveau).

COMPOSÉS OXYGÉNÉS DU CHLORE.

Le chlore forme avec l'oxygène cinq composés :

L'acide hypochloreux	ClO.
— chloreux	ClO^3.
— hypochlorique	ClO^4.
— chlorique	ClO^5.
— perchlorique	ClO^7.

Nous ne dirons que quelques mots de leurs propriétés principales.

Tous ces acides se décomposent facilement par la chaleur. Le plus stable est l'acide perchlorique; les autres se transforment tous par une élévation de température bien ménagée en acide perchlorique, chlore et oxygène; une élévation brusque de température les décompose avec explosion en chlore et oxygène. Tous ces composés sont des oxydants très-énergiques, grâce à leur facile décomposition.

ACIDE CHLORHYDRIQUE (HCl).

Équiv. en poids = 36,5
Équiv. en vol. = 4^{vol}

183. Cet acide, dont les propriétés et le mode de préparation furent indiqués par Glauber, s'appela longtemps *esprit de sel marin*. Lavoisier lui donna le nom d'*acide muriatique*, et le considéra comme un composé oxygéné, en partant de cette idée que l'oxygène seul pouvait former des acides. Gay-Lussac et Thenard montrèrent enfin qu'il ne contient que du chlore et de l'hydrogène.

184. **Propriétés physiques.** — L'acide chlorhydrique est un gaz incolore, d'une odeur piquante, d'une saveur très-acide.

Sa densité est 1,247. Le poids d'un litre de cet acide est donc $1^{gr},293 \times 1,247 = 1,614$.

Il est très-soluble dans l'eau, qui en dissout 480 fois son volume à la température ordinaire. L'absorption de l'acide chlorhydrique pur par l'eau est instantanée. Si l'on plonge dans une terrine pleine d'eau une éprouvette pleine de ce gaz pur, reposant sur une soucoupe qui contient du mercure, il suffira de soulever l'éprouvette pour que l'eau s'y précipite avec une violence capable de la briser. Si le gaz est mêlé d'un peu d'air, l'ascension de l'eau se fera bien moins rapidement. Un morceau de glace fond immédiatement dans le gaz acide chlorhydrique qu'il absorbe.

Ce gaz a été liquéfié par Faraday, soit par un froid de —50° à la pression ordinaire, soit sous la pression de 40 atmosphères à la température ambiante.

185. **Propriétés chimiques.** — L'acide chlorhydrique est un acide énergique, fumant à l'air : il s'empare de la vapeur d'eau qui existe dans l'atmosphère, et forme un composé dont la force élastique est moindre. Aussi se précipite-t-il sous forme de brouillard.

L'acide chlorhydrique est indécomposable par la chaleur. Une longue série d'étincelles le décompose partiellement en chlore et en hydrogène.

186. **Action des métalloïdes et des métaux.** — Les métalloïdes paraissent sans action sur l'acide chlorhydrique. Beaucoup de métaux, entre autres le fer, le zinc et l'étain, le décomposent à froid en donnant de l'hydrogène et un chlorure métallique :

$$Zn + HCl = H + ZnCl.$$

187. **Action de l'eau. Hydrates.** — La dissolution saturée d'acide à basse température a pour densité 1,21 ; elle contient 40 pour 100 d'acide. Elle peut se représenter par la formule

$$HCl + HO.$$

Ce liquide répand d'épaisses fumées au contact de l'air; il laisse peu à peu échapper une grande quantité de gaz à la température ordinaire, et peut alors être représenté par la formule

$$HCl + 12\,HO.$$

Cette dissolution chauffée abandonne une nouvelle quantité de gaz, et la température s'élève jusqu'à 110°. Le produit qui distille alors a pour formule

$$HCl + 16\,HO.$$

Sa densité est 1,10.

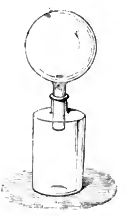
188. **Composition.** — On peut déterminer la composition de l'acide chlorhydrique par analyse ou par synthèse.

1° Analyse. — Dans une cloche courbe contenant 100 volumes de gaz acide chlorhydrique, on fait passer un globule de potassium, que l'on chauffe ensuite avec une lampe à alcool (*fig.* 103). Le potassium, s'emparant du chlore, met l'hydrogène en liberté. Il reste à la fin de l'expérience 50 volumes d'hydrogène.

Si de la densité de l'acide chlorhydrique.	1,2470
on retranche la demi-densité de l'hydrogène	0 0346
il reste sensiblement la demi-densité du chlore..	1,2124

Donc l'acide chlorhydrique est formé de volumes égaux de chlore et d'hydrogène, sans condensation.


Fig. 103.
Analyse de l'acide chlorhydrique.


Fig. 104.
Synthèse de l'acide chlorhydrique.

2° Synthèse. — Après avoir rempli de chlore sec, à la manière ordinaire, un flacon dont le col est usé à l'émeri, on remplit d'hydrogène sec un ballon de même capacité, et dont le col peut, en pénétrant dans celui du

flacon, le boucher hermétiquement (*fig.* 104). Les deux vases étant réunis, on les abandonne quelque temps à la lumière diffuse; la combinaison s'effectue lentement, et la teinte du chlore disparaît. On achève la combinaison par une exposition aux rayons solaires.

Si l'on ouvre alors les vases sur la cuve à mercure, on reconnaît que le volume n'a pas varié, et qu'il ne reste pas trace de chlore ni d'hydrogène, car le mercure n'est pas attaqué, et l'eau dissout le gaz sans résidu. On arrive donc encore à cette conclusion que le chlore et l'hydrogène se combinent à volumes égaux, sans condensation. Comme d'ailleurs l'équivalent en volumes du chlore est 2^{vol} comme celui de l'hydrogène, il en résulte que l'équivalent en volume de l'acide chlorhydrique est 4^{vol}.

189. **État naturel.** — Cet acide se dégage des volcans en activité. Il se trouve aussi, avec l'acide sulfurique, dans le *Rio-Vinagre*, qui descend de la chaîne des Andes, en Amérique.

190. **Préparation.** — On prépare l'acide chlorhydrique en mettant dans un ballon de verre du chlorure de sodium (sel marin) avec de l'acide sulfurique. La réaction commence à froid, il faut ensuite chauffer pour l'achever (*fig.* 105).

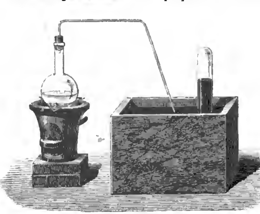


Fig. 105.
Préparation de l'acide chlorhydrique dans les laboratoires.

Quand on emploie le sel marin ordinaire, il ne faut ajouter l'acide sulfurique que peu à peu, afin d'éviter un trop grand boursouflement. On peut mettre tout l'acide à la fois quand on emploie le sel fondu.

Le gaz qui se dégage passe d'abord dans un flacon laveur où il abandonne l'acide sulfurique entraîné; il se rend ensuite dans une éprouvette sur le mercure.

La réaction qui se produit ici est la suivante :

$$NaCl + HO, SO^3 = NaO, SO^3 + HCl.$$

Quand on veut préparer une dissolution d'acide chlorhydrique, on fait passer le gaz dans un appareil de Woulf. Les flacons doivent être à moitié pleins d'eau distillée; les tubes (*fig.* 106) n'ont besoin que de plonger très-peu, car la dissolution, étant plus dense que l'eau, tombe au fond au fur et à mesure qu'elle se sature.

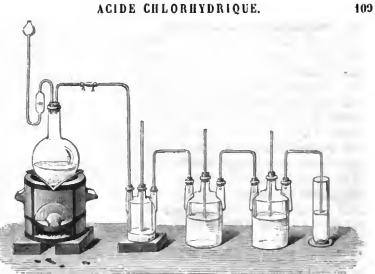


Fig. 106. — Préparation de l'acide chlorhydrique en dissolution.

Fig. 107. — Préparation industrielle de l'acide chlorhydrique.

191. **Préparation industrielle.** — On chauffe le mélange de sel marin et d'acide sulfurique dans des cornues en fonte (*fig.* 107). Après avoir mis le sel et refermé la cornue, on introduit l'acide par un entonnoir courbe. Cet entonnoir doit, pendant l'opération, être remplacé par un bouchon métallique. Le gaz acide va se dissoudre dans des bonbonnes qui contiennent de l'eau. Quand les premières bonbonnes sont saturées, on les enlève et l'on rapproche les suivantes, qui achèvent de se saturer à leur tour. L'acide doit marquer 22° Baumé.

192. **Purification.** — L'acide du commerce est impur; il contient un peu d'acide sulfurique entraîné, de l'acide sulfureux produit par l'action de l'acide sulfurique sur la fonte à haute température, du chlorure de fer produit par l'acide chlorhydrique réagissant sur la fonte, des sels qui se trouvaient dans l'eau employée pour la dissolution de l'acide. Enfin il peut y avoir du chlorure d'arsenic si l'acide sulfurique a été préparé à l'aide des pyrites.

La présence de l'acide sulfurique se reconnaît à l'aide du chlorure de baryum. S'il y a de l'acide sulfureux, on l'oxyde d'abord par du chlore, et on le précipite ensuite comme il vient d'être dit.

L'arsenic donne avec l'acide sulfhydrique un précipité jaune.

Pour purifier l'acide chlorhydrique, on ajoute d'abord un peu de bioxyde de manganèse, qui donne le chlore nécessaire à l'oxydation de l'acide sulfureux; puis, après avoir chassé l'excès de chlore, on ajoute du sulfure de baryum, qui précipite l'acide sulfurique et l'arsenic. Le liquide décanté, devra être ensuite soumis à la distillation.

193. **Usages.** — L'acide chlorhydrique est surtout employé pour préparer le chlore destiné à la fabrication du chlorure de chaux. Il sert à l'état de dissolution, dans les laboratoires, pour préparer l'acide carbonique et l'acide sulfhydrique; il peut remplacer l'acide sulfurique dans la préparation de l'hydrogène.

EAU RÉGALE.

194. **Propriétés. Composition.** — C'est un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide azotique. On l'appelle eau régale parce qu'elle dissout l'or (*le roi des métaux*) et le platine, inattaquables par les acides séparés. On peut mettre en évidence cette propriété à l'aide de l'expérience suivante : Deux ballons contenant, outre une feuille d'or, l'un de l'acide azotique, l'autre de l'acide chlorhydrique peuvent être chauffés sans que la feuille d'or soit attaquée; mais si l'on vient à verser le contenu de l'un d'eux dans l'autre, de manière à mélanger les deux acides, on voit immédiatement l'or disparaître.

L'eau régale est un liquide jaune rougeâtre; elle agit surtout par le chlore à l'état naissant.

BROME (Br).	IODE (Io).
Équiv. en poids = 80	Équiv. en poids = 127
Équiv. en vol. = 2vol	Équiv. en vol. = 2vol

Le BROME a été découvert en 1826 dans les eaux mères des marais salants par M. Balard, qui en a étudié toutes les propriétés.

L'IODE avait été trouvé par Courtois en 1811 dans les eaux mères des soudes de varechs. C'est Gay-Lussac qui en a fait connaître les propriétés en 1813.

195. **Propriétés physiques.** — Le *brôme* est un liquide rouge noirâtre, d'une densité égale à 2,97 à la température ordinaire. Il se solidifie à 7° en une masse gris de plomb. Le *brôme* bout à 63 degrés; la densité de sa vapeur est 5,97.

L'*iode* est solide, gris d'acier, d'un éclat presque métallique; sa densité est 5. Il fond à 107° et bout à 180°; sa vapeur est d'une belle couleur violette. La densité de cette vapeur est 8,716.

Le *brôme* et l'*iode* ont une odeur désagréable et caractéristique.

196. **Propriétés chimiques.** — Le *brôme* et l'*iode* se comportent comme le chlore. Ils forment avec les métaux des bromures et des iodures isomorphes des chlorures.—Avec l'hydrogène, ils donnent des acides bromhydrique et iodhydrique, gazeux, incolores, très-solubles dans l'eau, et qui, au contact de l'air, répandent d'abondantes fumées comme l'acide chlorhydrique.

L'affinité de ces corps pour l'*hydrogène* et les métaux est cependant moindre que celle du chlore; ainsi, le brôme ne se combine directement avec l'hydrogène que sous l'influence de la chaleur, l'iode ne se combine pas directement avec l'hydrogène. — Le chlore déplace le brôme des bromures et de l'acide bromhydrique. Le chlore et le brôme déplacent l'iode des iodures et de l'acide iodhydrique.

L'affinité pour l'oxygène suit un ordre inverse; ainsi, l'affinité du brôme pour l'*oxygène* est plus grande que celle du chlore; celle de l'iode est encore supérieure à celle du brôme. Aussi les acides bromique et iodique sont-ils plus stables que l'acide chlorique.

Le brôme et l'iode sont, comme le chlore, très-dangereux à respirer : ils désorganisent les muqueuses.

197. **Réactifs de l'iode.** — La propriété caractéristique de l'iode est la coloration bleue que des traces de ce corps en dissolution dans l'eau développent à la température ordinaire au contact de l'empois d'amidon.

Pour reconnaître la présence d'une iodure dans une liqueur, il suffit

d'ajouter un peu d'empois d'amidon, puis quelques gouttes d'une dissolution de chlore. L'iode, mis en liberté, colore immédiatement l'amidon en bleu.

198. **État naturel.**— Le brôme et l'iode existent dans les eaux de la mer. C'est là que le puisent les varechs et les éponges. L'huile de foie de morue doit ses propriétés à l'iode qu'elle contient.

199. **Usages.** — Le brôme et l'iode sont employés dans les laboratoires. En photographie on les utilise concurremment avec le chlore, grâce à ce que la lumière attaque les bromure et iodure d'argent, à peu près comme le chlorure. L'iode est de plus employé en médecine

IODURE D'AZOTE.

200. Nous avons déjà dit que le chlore forme avec l'azote un composé qui détone spontanément avec une violence extrême. L'iode forme aussi avec l'azote un corps détonant, mais qui, préparé en petite quantité, n'est nullement dangereux. On l'obtient en broyant un peu d'iode avec une dissolution d'ammoniaque. Il se forme une poudre noire qu'on fait sécher sur du papier à filtre. Humide, il peut être manié sans inconvénient, mais, dès qu'il est sec, il détone par le simple contact d'une barbe de plume. Sa formule parait être : $Az^2H^3I^3$. C'est donc de l'ammoniaque dans lequel moitié de l'hydrogène aurait été remplacé par de l'iode.

FLUOR (Fl).

Équiv. en poids = 19
Équiv. en vol. = »

201. Le fluor n'a pas encore été isolé. On admet depuis Ampère l'existence de cet élément, en se fondant sur ce que le *spath fluor* (minéral regardé comme étant le fluorure de calcium) donne, avec l'acide sulfurique, du sulfate de chaux et un gaz fumant à l'air comme les acides chlorhydrique, bromhydrique, iodhydrique, et formant, avec les métaux, des corps analogues aux chlorure, bromure et iodure correspondants.

ACIDE FLUORHYDRIQUE (HFl).

Équiv. en poids = 20
Équiv. en vol. = 4^{vol}

202. **Propriétés physiques.** — Liquide incolore, fumant à l'air, d'une odeur très-piquante. Sa densité est 1,06, il bout à 15°.

Versé dans l'eau, il fait entendre un sifflement aigu, et dégage assez de chaleur pour porter la température à près de 100°.

203. **Propriétés chimiques.** — Il attaque tous les métaux, sauf l'or, l'argent et le platine. Sa propriété la plus remarquable consiste dans son action sur la silice, avec laquelle il forme de l'eau et du fluorure de silicium.

$$3\,HFl + SiO^3 = SiFl^3 + 3\,HO.$$

On utilise cette propriété dans la gravure sur verre.

204. **Préparation.** — On chauffe légèrement du fluorure de calcium pulvérisé et de l'acide sulfurique dans une cornue de plomb (*fig.* 108) formée de trois parties : la panse, le dôme muni d'un col, et le récipient, espèce de tube recourbé qui doit être entouré de glace. La formule suivante, qui représente la réaction, montre l'analogie de cette préparation et de celle de l'acide chlorhydrique.

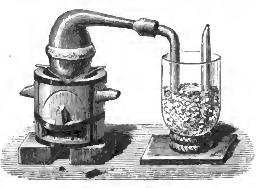


Fig. 108.
Préparation de l'acide fluorhydrique.

$$CaFl + SO^3HO = HFl + CaOSO^3.$$

L'acide liquide recueilli dans le récipient doit être conservé dans une bouteille en argent ou en gutta-percha.

205. **Usages.** — La propriété d'attaquer la silice est utilisée dans les laboratoires pour l'analyse des silicates.

Elle est mise à profit dans les arts pour la gravure sur verre. Le verre est d'abord enduit d'une couche mince de vernis (formé en fondant ensemble 3 parties de cire et 1 partie d'essence de térébenthine). Dès que le vernis est refroidi, on trace avec une pointe les traits que l'on veut reproduire, en ayant soin d'y mettre à nu la surface du verre. Pour faire agir alors la vapeur d'acide fluorhydrique, on met dans un vase plat, en plomb ou en terre, du fluorure de calcium et de l'acide sulfurique concentré, et après avoir placé au-dessus la lame de verre, on chauffe doucement. La vapeur réagit et l'opération est terminée en quelques minutes. On enlève la lame et on la chauffe pour fondre le vernis, qu'on retire en frottant avec un linge. Les traits apparaissent alors opaques sur la lame transparente.

Au lieu d'exposer le verre aux vapeurs, on peut le recouvrir d'acide

fluorhydrique étendu d'eau. L'attaque se produit encore, mais les traits, au lieu d'être opaques, sont transparents, et par suite, moins visibles.

C'est au moyen de l'acide fluorhydrique que l'on grave les divisions sur les tiges des thermomètres et sur les burettes ou pipettes graduées.

CHAPITRE VII

Carbone et ses composés. — Bore. — Silicium.

CARBONE (C.).

Équiv. en poids = 6
Équiv. en vol. = »

206. **Propriétés physiques.** — Le carbone est un corps solide, infusible et fixe aux températures de nos fourneaux. Sous l'influence d'une pile de 500 éléments, Desprets a pu le ramollir et le volatiliser partiellement.

Il est insoluble dans tous les liquides, sauf dans la fonte de fer en fusion.

Le carbone se présente avec des aspects très-différents; toutes ses variétés jouissent des caractères que nous venons de signaler, mais elles diffèrent les unes des autres par un grand nombre d'autres propriétés, telles que la couleur, la densité, la dureté, la conductibilité pour la chaleur et l'électricité.

207. **Variétés de carbone.** — Nous examinerons successivement ces diverses variétés en les réunissant en deux groupes comprenant : le premier, les charbons naturels : ***diamant, graphite*** ou ***plombagine, anthracite, houille, lignite;*** le second, les charbons artificiels : ***coke, charbon des cornues, charbon de bois, noir de fumée, noir animal.***

CHARBONS NATURELS.

208. **Diamant.** — Le diamant est le plus dur des corps connus. Il raye tous les autres corps et ne peut être rayé par aucun d'eux. On ne peut l'user que par sa propre poussière.

Il est généralement incolore, mais souvent aussi il est jaune ou rose, bleu ou vert, enfin il est quelquefois noir et opaque. On le trouve toujours cristallisé soit en ***octaèdres réguliers***, soit en cristaux à vingt-quatre ou quarante-huit faces, dérivés de ce même octaèdre (*fig.* 109).

Sa densité varie de 3,50 à 3,55. Il est mauvais conducteur de la chaleur et de l'électricité.

Le diamant est très-réfringent, c'est à son pouvoir dispersif que sont dus les jeux de lumière qui le font rechercher. On multiplie les *feux* du diamant en le taillant de manière à augmenter le nombre des facettes.

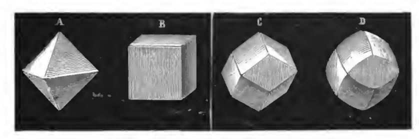


Fig. 109. — Diamants bruts.

209. **Taille du diamant.** — Pour le tailler, on commence par le dégrossir en utilisant sa propriété d'être *clivable*, suivant des directions parallèles aux faces de l'octaèdre. On achève ensuite la taille en usant le diamant sur des meules d'acier recouvertes de poussière de diamant humectée d'huile. Cette poussière est obtenue en écrasant des diamants noirs très-durs, et les éclats provenant du dégrossissement. La taille diminue souvent de moitié le poids du diamant.

On taille généralement les diamants peu épais en *rose* et les diamants épais en *brillants*. Dans la rose (*fig.* 110), le dessous du diamant est plat ; la partie supérieure forme un dôme à vingt-quatre facettes.

Dans le brillant (*fig.* 111), la *table*, ou face plane supérieure, est entourée de facettes obliques, et la *culasse*, ou partie inférieure comprenant les deux tiers du diamant, forme une pyramide dont les facettes correspondent à celles de la partie supérieure.



Fig. 110. — Diamant taillé en rose.



Fig. 111. — Diamant taillé en brillants.

Le plus gros diamant connu est celui du rajah de Bornéo; il pèse 300 *carats* [(300 × 0gr,212). Celui de l'empereur du Mogol pèse 279 carats;

celui de l'empereur de Russie 193 carats. Le *Régent*, de France, pèse 137 carats. C'est un des diamants les plus beaux, grâce à sa limpidité parfaite.

210. **État naturel.**—On trouve le diamant dans les sables d'alluvion, aux Indes, à l'île de Bornéo, au Brésil, en Sibérie et dans les monts Ourals. L'extraction du diamant en donne chaque année quelques kilogrammes seulement, dont une très-petite portion est susceptible d'être soumise à la taille.

La *nature* du diamant est restée longtemps inconnue. Lavoisier constata le premier qu'en concentrant, à l'aide d'une forte lentille, les rayons solaires sur un diamant placé dans un ballon plein d'oxygène, on obtient de l'acide carbonique. Davy a montré que l'acide carbonique est le seul produit formé, et que, par suite, le diamant est du carbone pur.

Soumis à l'action calorifique d'une forte pile, dans le vide ou dans un gaz inerte, le diamant se gonfle, noircit et se change en une espèce de plombagine friable qui laisse une trace grise sur le papier.

La transformation inverse, tentée bien des fois, n'a jamais réussi d'une manière complète.

211. **Usages.** — Indépendamment de son emploi en bijouterie, le diamant sert encore à faire des pivots pour l'horlogerie, des pointes d'outils pour percer ou graver les pierres dures et pour couper le verre.

212. **Graphite** ou **Plombagine**. — Il se présente sous forme de paillettes brillantes d'un gris d'acier, ou en masses feuilletées qu'on peut rayer avec l'ongle. Il laisse sur le papier une tache noire, parce que les lamelles qui le constituent se désagrègent et adhèrent au papier.

Sa densité est 2,2. Il conduit bien la chaleur et l'électricité.

Le graphite ne brûle dans l'oxygène qu'à une température élevée.

On le trouve dans les terrains primitifs en France, en Angleterre, en Espagne. Il contient toujours 1 à 2 pour 100 d'impuretés.

Il sert à la fabrication des crayons, et prend le nom de *mine de plomb*. On l'utilise encore en galvanoplastie pour *métalliser* les surfaces des moules mauvais conducteurs, c'est-à-dire pour rendre ces surfaces conductrices de l'électricité. — Mêlé avec l'eau, il sert à noircir les poêles, tuyaux, trappes de cheminées, etc.

La fonte saturée de charbon abandonne, en se solidifiant lentement, une certaine quantité de graphite à l'état de paillettes hexagonales. La fonte grise doit sa couleur à un très-grand nombre de petites parcelles de graphite disséminées dans le métal.

213. **Anthracite.** — L'anthracite, appelée aussi *charbon de pierre*, est compacte et dure; elle ne brûle qu'à une température élevée, mais elle produit alors une très-grande quantité de chaleur, aussi est-ce un très-bon combustible, toutes les fois que le tirage est suffisant.

L'anthracite contient toujours un peu de silice, d'alumine, et d'oxyde de fer; les impuretés peuvent s'élever à 8 ou 10 pour 100.

On la trouve dans les terrains antérieurs au terrain carbonifère, aux États-Unis, en Angleterre, et en France sur les bords de la Loire.

214. **Houille** ou **charbon de terre**. — La houille est d'un noir brillant, elle se trouve dans le terrain supérieur au terrain carbonifère en Angleterre, en France, en Belgique, en Allemagne, etc.

Elle est moins pure que l'anthracite, et contient des bitumes, aussi brûle-t-elle avec une flamme plus ou moins fuligineuse. Les houilles *grasses* sont des houilles à longue flamme (Mons), les houilles *maigres* brûlent à courte flamme (Charleroi).

Des empreintes de feuilles, de tiges, de fruits, indiquent suffisamment que la houille résulte de l'altération lente des végétaux.

215. **Lignites**. — Les lignites se trouvent à la base des terrains tertiaires. Ils conservent encore la forme et même la structure intime des végétaux qui les ont formés.

Leur couleur est généralement noire. Ils sont encore plus impurs que la houille.

La *tourbe*, d'origine encore plus récente que les lignites, et formée presque exclusivement de végétaux qui croissent dans les marais, contient une très-grande quantité de matières étrangères.

CHARBONS ARTIFICIELS.

216. **Coke et charbon des cornues**. — La distillation de la houille dans les cornues à gaz de l'éclairage, donne un résidu poreux appelé *coke* (60 pour 100 environ), et un dépôt très-dense qui incruste les parois, et qu'on appelle *charbon des cornues*.

Le *coke* est gris noirâtre, souvent terne, quelquefois doué d'un éclat métallique. Il est poreux et plus ou moins caverneux, suivant que la distillation a été plus ou moins rapide. Il conserve la forme de la houille quand il provient de houilles maigres; il est, au contraire, boursouflé quand il provient de houilles grasses.

Il brûle sans flamme et sans fumée, en produisant une chaleur intense.

Le *charbon des cornues* est extrêmement dur; sa densité est presque égale à celle du diamant. — Il est bon conducteur de la chaleur et de l'électricité; aussi l'emploie-t-on, en physique, pour faire des conducteurs de piles. — On l'utilise encore pour faire des tubes, des creusets, des nacelles infusibles et inattaquables. Quand on dispose d'un tirage convenable, on l'emploie avantageusement comme combustible parce qu'il ne laisse que très-peu de cendres, et par suite, n'attaque pas les creusets, que la houille ou le coke détériorent très-rapidement.

217. **Charbon de bois**. — Le charbon de bois est le résidu de la distillation du bois ou de sa combustion incomplète. Il est noir, fragile et poreux.

Préparé à basse température (400°), il conduit mal la chaleur et l'électricité, mais il s'enflamme très-facilement, surtout s'il provient de bois légers, tels que le fusain; c'est ce charbon qu'on emploie pour la fabrication de la poudre.

Préparé à haute température (1200° à 1500°), il conduit bien la chaleur et l'électricité : la braise de boulanger est souvent employée pour mettre le conducteur des paratonnerres en communication avec le sol ; le charbon ainsi obtenu ne s'enflamme qu'au rouge.

218. Absorption des gaz. — Le charbon de bois absorbe les gaz en grandes quantités. Pour le démontrer, on éteint sous le mercure un morceau de charbon porté au rouge, afin que l'air ne puisse rentrer dans ses pores pendant le refroidissement, puis on l'introduit dans une éprouvette pleine de gaz ammoniac ou d'acide chlorhydrique; on voit le gaz disparaître dans les pores du charbon.

1 volume de charbon absorbe :

90vol	de	gaz ammoniac.
85	—	acide chlorhydrique.
65	—	acide sulfureux.
55	—	acide sulfhydrique.
40	—	protoxyde d'azote.
35	—	acide carbonique.
35	—	bicarbure d'hydrogène.
9,5	—	oxyde de carbone.
9,25	—	oxygène.
7,5	—	azote.
1,75	—	hydrogène.

On voit par ce tableau l'analogie qui existe entre l'absorption et le phénomène de la dissolution : les gaz les plus solubles sont les plus absorbables.

Cette absorption est d'autant plus grande que la température est plus basse. Elle devient nulle à 100°. — Le charbon abandonne tout son gaz dans le vide. — Les charbons lourds, à pores très-petits, comme le charbon de buis, sont ceux qui absorbent le mieux les gaz. — On utilise ces propriétés du charbon pour désinfecter les eaux qui sortent des amphithéâtres de dissection et pour conserver l'eau pure dans les fontaines.

219. **Préparation du charbon**. — Le bois n'a pas une composition constante, cependant elle s'éloigne généralement peu de la suivante :

Charbon.	38,5
Eau combinée	35,5
Eau libre	25,0
Cendres	1,0
	100,0

On prépare le charbon de bois par deux procédés : 1° par distillation dans des cornues; 2° par le procédé des meules.

1° Procédé par distillation — Le bois est chauffé dans des cornues cylindriques; il se dégage des gaz : oxyde de carbone, acide carbonique, carbures d'hydrogène, en même temps que des produits liquides; vinaigre de bois, esprit de bois, goudron, etc. — On obtient de cette façon 27 pour 100 de charbon. — Le charbon ainsi préparé à une température peu élevée est surtout employé à la fabrication de la poudre; il a l'avantage d'être homogène et très-combustible.

2° Carbonisation en meules. — Le procédé des meules se pratique sur place, au milieu des forêts où le bois a été coupé; il est le plus expéditif et le moins coûteux; aussi est-il le plus constamment employé, bien que tous les produits volatils soient perdus et que le rendement en charbon ne soit que de 17 à 18 pour 100.

Autour de quelques longues perches verticales (*fig.* 112) enfoncées en terre et circonscrivant une cavité qui doit faire fonction de cheminée, on dispose verticalement des morceaux de bois de 1 mètre environ de hauteur, en les serrant le plus possible les uns contre les autres; on forme ainsi un premier lit, sur lequel on en superpose un second, puis un

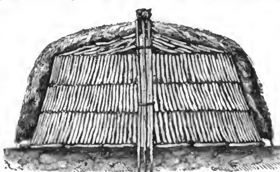


Fig. 112. — Constitution d'une meule.



Fig. 113. — Meule à demi carbonisée.

troisième, dont les diamètres vont en diminuant de manière à constituer une espèce de dôme ou de meule, sous laquelle on a ménagé

plusieurs canaux horizontaux en communication avec la cheminée verticale. On recouvre ensuite le tout de feuilles, de mousse, de gazon, et enfin d'une couche de terre qui ne laisse libre que la cheminée et les ouvertures des canaux inférieurs.

On remplit alors la cheminée avec du bois enflammé. La combustion se communique de proche en proche; la fumée est d'abord noire, elle devient de plus en plus transparente puis d'un bleu clair. La carbonisation est alors achevée dans le voisinage de la cheminée; on la bouche et l'on ouvre des évents à 30 centimètres au-dessous. Dès que la fumée y devient transparente, on bouche ces évents à leur tour pour en ouvrir d'autres plus bas, et ainsi de suite jusqu'à la base des meules. La figure 113 donne une idée de la marche de la carbonisation. On couvre ensuite avec de la terre toutes les ouvertures, et on laisse refroidir vingt-quatre heures. Au bout de ce temps on enlève la terre, et on sépare le charbon bien cuit des *fumerons*, qui se distinguent à leur couleur terne et à leur résistance à la rupture.



Fig. — 114. — Préparation du noir de fumée.

220. Noir de fumée. — Poussière noire, très-légère et très-fine, retenant un peu de matières huileuses qu'on peut détruire par une calcination.

Il se produit dans la combustion incomplète des résines. Pour le préparer on fait brûler des résines, dont la flamme fuligineuse se rend dans des chambres (*fig.* 114) dont les parois sont recouvertes de toiles sur

lesquelles le noir de fumée se dépose peu à peu. Un cône, en descendant le long de ces toiles, fait tomber tout le noir, que l'on recueille. Quand on a plusieurs chambres successives, le noir le plus fin se dépose le plus loin.

On utilise le noir de fumée pour la peinture et pour l'encre d'imprimerie. Les parties les plus fines sont employées pour la fabrication de l'encre de Chine.

Ce charbon, bien calciné, donne du carbone pur. On obtient du carbone pur plus compacte et d'un emploi plus commode en calcinant du sucre dans un creuset.

221. **Noir animal.** — Il provient de la calcination des os en vase clos. C'est un corps noir, poreux, conservant la forme des os, mais ne contenant guère que 10 à 12 pour 100 de charbon; le reste est formé de phosphate et de carbonate de chaux.

Réduit en petits grains, il absorbe très-rapidement les matières colorantes. Agité avec de la teinture de tournesol ou avec du vin il donne un liquide qui passe incolore à travers un filtre.

Cette propriété est utilisée dans l'industrie pour décolorer le jus de betterave ou le sirop brut des cannes à sucre; ces liquides ne laissent déposer le sucre qu'à la condition d'avoir été dépouillés de la matière colorante.

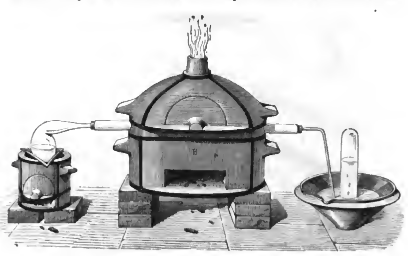


Fig. 115. — Décomposition de l'eau par le charbon.

222. **Propriétés chimiques du charbon.** — Le charbon, chauffé au contact de l'oxygène ou de l'air en excès, se transforme en acide carbonique, CO^2; s'il y avait excès de carbone, il se produirait de l'oxyde de carbone CO.

Chauffé au milieu de la vapeur du soufre, il donne du sulfure de carbone, CS^2, analogue à l'acide carbonique et produit, comme on le voit, dans des circonstances tout à fait semblables.

L'azote libre ne se combine avec le carbone qu'en présence des alcalis. Un courant d'azote, passant sur des charbons imprégnés de potasse, donne du cyanogène, C^2Az, qui reste uni au potassium : KC^2Az.

223. **Action sur les composés oxygénés.** — L'affinité du charbon pour l'oxygène peut faire prévoir son action sur les composés oxygénés.

L'eau est décomposée au rouge par le charbon; il suffit de faire passer de la vapeur d'eau dans un tube de porcelaine (*fig.* 115) rempli de braise et chauffé au rouge. Il se produit alors de l'hydrogène, de l'oxyde de carbone :

$$C + HO = CO + H.$$

On peut encore faire l'expérience en introduisant à l'aide d'une pince (*fig.*116) un charbon incandescent sous une cloche pleine d'eau.



Fig. 116. — Charbon éteint sous l'eau.

Cette décomposition de l'eau par le charbon porté au rouge, et la production de gaz combustibles, explique comment une petite quantité d'eau projetée sur un brasier ardent en augmente l'intensité au lieu de la diminuer. Les forgerons savent parfaitement qu'en aspergeant leur charbon ils activent la combustion.

La production de l'oxyde de carbone, gaz très-délétère, nous montre qu'il y aurait danger à essayer d'éteindre un feu au moyen d'une quantité insuffisante d'eau dans une chambre où l'air ne se renouvelle pas assez rapidement.

On utilise constamment le charbon, en métallurgie, pour la réduction des oxydes; *ex :* métallurgie du fer, du zinc, etc.

ACIDE CARBONIQUE (CO^2)

Équiv. en poids = 22
Équiv. en vol. = 2^{vol}

Ce corps, appelé longtemps ***air fixe***, ***air crayeux*** a été découvert, en 1648, par Van Helmont. Black et Priestley en firent connaître les différentes propriétés. Sa nature et sa composition n'ont été indiquées que par Lavoisier, en 1776.

224. Propriétés physiques. — L'acide carbonique est un gaz incolore, d'une odeur piquante, d'une saveur légèrement aigrelette.

Sa densité est 1,529; par suite, un litre de ce gaz pèse $1^{gr},293 \times 1,529 = 1,97$.

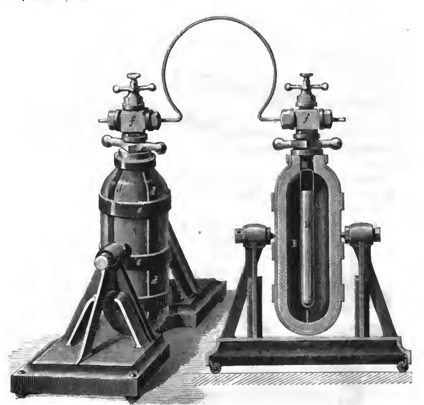


Fig. 117. — Liquéfaction de l'acide carbonique.

Pour mettre en évidence sa grande densité, on en remplit une cloche sur la cuve à eau, puis, après avoir fermé l'ouverture à l'aide d'une lame

de verre, on la retourne. Si alors on fait tomber dans la cloche des bulles de savon, on les voit rebondir comme à la surface de l'eau.

L'eau dissout son volume d'acide carbonique à la température ordinaire. Ce gaz a été liquéfié par Faraday à 0° sous la pression de 36 atmosphères.

225. **Liquéfaction.** — On réalise aujourd'hui cette liquéfaction à l'aide d'un appareil dû à Thilorier et perfectionné par M. Donny (*fig.* 117).

Cet appareil se compose de deux réservoirs qu'on peut mettre en communication à l'aide d'un tube métallique muni d'un robinet. Pour donner à ces réservoirs une grande résistance, on les compose d'un cylindre de plomb entouré d'une enveloppe de cuivre rouge maintenue par des cercles de fer forgé, serrés les uns contre les autres par de longs barreaux de fer qui réunissent deux disques épais formant les extrémités de l'appareil.

L'un des réservoirs, appelé le *générateur*, est mobile autour d'un axe horizontal passant par son milieu. Une large ouverture, ménagée dans le disque supérieur, permet d'y introduire d'abord du bicarbonate de soude et de l'eau tiède, puis un cylindre de cuivre rempli d'acide sulfurique ordinaire; on ferme alors l'ouverture à l'aide d'un fort bouchon métallique à vis, et percé d'un canal muni d'un robinet. On incline l'appareil de manière à faire couler un peu d'acide sur le bicarbonate, puis, au bout de quelques instants, on incline davantage, et ainsi de suite, jusqu'à ce que tout l'acide ait été employé. On met alors le générateur en communication avec le *récipient*. L'acide se précipite dans l'espace froid et s'y liquéfie.

En recommençant l'opération un certain nombre de fois, on peut obtenir plusieurs litres de liquide.

Si on laisse échapper dans l'air cet acide liquide en ouvrant le robinet, il s'en vaporise une partie, mais cette vaporisation est accompagnée d'une très-grande absorption de chaleur qui détermine la solidification, sous forme de neige, d'une autre partie du liquide. Pour recueillir cette neige, on place devant l'ouverture une boîte sphérique (*fig.* 118) dont chaque moitié présente, suivant l'axe, un tube que l'on tient par un manche creux, mauvais conducteur. Le gaz et la neige arrivant tangentiellement, tournent dans cet appareil; la plus grande partie de la neige se dépose, et le gaz se dégage par les ouvertures dirigées suivant l'axe.

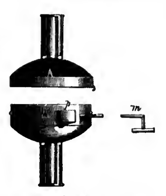


Fig. 118. — Boîte pour la solidification de l'acide carbonique.

On peut, avec cette neige, produire de très-grands froids. Seule, elle

ne refroidit pas beaucoup, parce qu'elle ne mouille pas les corps, mais si on y ajoute un peu d'éther qui établit un contact parfait, la température s'abaisse à 90° au-dessous de zéro. Placé sous le récipient, où l'on fait le vide, ce mélange descend à — 110° . On peut à cette température liquéfier tous les gaz, sauf l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, l'oxyde de carbone et le bioxyde d'azote.

226. **Propriétés chimiques.** — Le gaz acide carbonique est impropre à la combustion; une bougie allumée, plongée dans ce gaz, s'y éteint immédiatement. On peut faire l'expérience de manière à mettre en évidence sa grande densité. Pour cela, on le verse sur la bougie (*fig.* 119) en inclinant l'éprouvette comme si on versait de l'eau; on voit aussitôt la flamme s'éteindre.

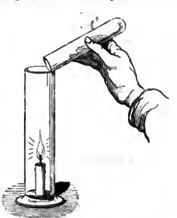


Fig. 119. — Acide carbonique versé sur une bougie.

L'acide carbonique est impropre à la respiration, de là le danger de rester auprès d'une cuve en fermentation dans un local mal aéré.

Ce gaz rougit faiblement la teinture de tournesol; il trouble l'*eau de chaux* en formant du carbonate de chaux insoluble.

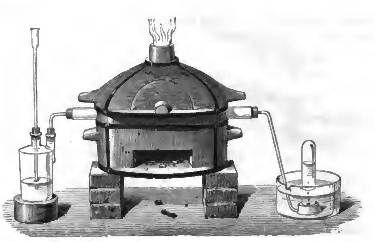


Fig. 120. — Décomposition de l'acide carbonique par le charbon.

L'acide carbonique est indécomposable par la chaleur. Il est décompo-

sable par la plupart des corps combustibles qui, le ramènent à l'état d'oxyde de carbone. Nous ne citerons que l'exemple du carbone.

Action du charbon. — Un courant de gaz acide carbonique, passant sur du charbon chauffé au rouge dans un tube de porcelaine (*fig.* 120), lui cède la moitié de son oxygène et donne ainsi un volume d'oxyde de carbone double du volume de l'acide :

$$CO^2 + C = 2\,CO.$$

La même réaction se produit toutes les fois que dans un fourneau allumé se trouve une couche épaisse de charbons ; l'acide carbonique formé à la base passant sur des charbons rouges, se décompose et donne de l'oxyde de carbone qui vient se dégager à la partie supérieure. Si toute la couche de charbon est incandescente, le gaz oxyde de carbone brûle avec une flamme bleue en arrivant au contact de l'air, et reproduit de l'acide carbonique; si, au contraire, le gaz s'est suffisamment refroidi en traversant des couches épaisses de charbons noirs, l'oxyde de carbone se répand dans l'atmosphère.

227. **Composition.** — On détermine la composition de l'acide carbonique en faisant brûler du charbon dans de l'oxygène pur. Pour cela on prend un ballon à trois tubulures; par l'une d'elles, on pourra faire le vide et remplir ensuite le ballon d'oxygène pur. Les deux autres tubulures sont traversées par des fils de platine dont l'un est terminé par une petite coupelle contenant le charbon pur ou le diamant sur lequel on veut opérer. En faisant communiquer les deux extrémités des fils avec une pile, on voit le charbon brûler et disparaître, et on reconnaît que le volume n'a pas changé ; on en doit conclure que l'acide carbonique contient un volume d'oxygène égal au sien.

Si de la densité de l'acide carbonique. . . .	1,529
On retranche la densité de l'oxygène. . . .	1,106
Il reste un poids de carbone égal à.	0,423

Ce qui donne par la composition en centièmes :

Carbone.	27,6
Oxygène.	72,4
	100,0

228. **Synthèse de MM. Dumas et Stas.** — La composition de l'acide carbonique a été établie d'une manière rigoureuse par la belle expérience de MM. Dumas et Stas.

Leur méthode consiste à faire passer un courant d'oxygène sur du diamant ou du graphite pur, chauffé au rouge dans un tube de porcelaine (*fig.* 121). L'acide carbonique produit est absorbé par des tubes à potasse

tarés d'avance; leur augmentation de poids donne la quantité d'acide carbonique formé. Le carbone contenu dans la nacelle a été pesé avant et après. On connaît donc le poids du carbone qui donne un poids connu d'acide carbonique.

On trouve ainsi :

Carbone. . .	27,27
Oxygène. . .	72,73
	100,00

Ces nombres montrent que, pour 16 d'oxygène, il y a 6 grammes de carbone.

Remarque. Comme dans la combustion du carbone, il peut se former une petite quantité d'oxyde de carbone, on a disposé à la suite de la nacelle un peu d'oxyde de cuivre qui transforme en acide carbonique le gaz qui, sans cela, échapperait à l'absorption par la potasse.

On peut enfin, à l'aide d'un tube à ponce sulfurique placé avant la potasse, recueillir l'eau provenant d'une petite quantité d'hydrogène qui existe quelquefois dans le carbone.

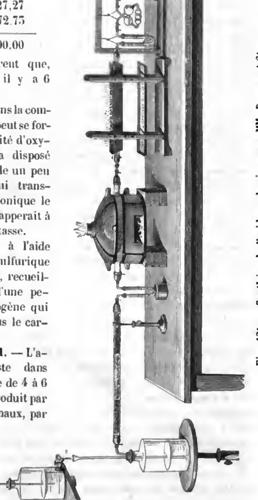


Fig. 121. — Synthèse de l'acide carbonique par MM. Dumas et Stas.

229. État naturel. — L'acide carbonique existe dans l'atmosphère à la dose de 4 à 6 dix-millièmes. Il est produit par la respiration des animaux, par les combustions qui constituent nos moyens de chauffage et d'éclairage, par les fermentations et la décomposition des matières organiques. Certaines eaux minérales

sont très-chargées d'acide carbonique, telles sont les eaux de Seltz, de Pougues, etc.

Ce gaz se dégage quelquefois des fissures du sol, comme dans la grotte du Chien, près de Pouzzoles. Cette grotte doit son nom à ce qu'elle présente une couche d'environ 50 centimètres d'acide carbonique dans laquelle un chien, ou tout animal de petite taille, périt asphyxié, tandis qu'un homme peut y respirer sans malaise.

L'acide carbonique tendant toujours, par sa grande densité, à s'accumuler dans les parties les plus basses, pourra rendre irrespirable l'air de certaines caves ou d'autres salles mal aérées. On reconnaîtra facilement si l'air est vicié par l'acide carbonique en y faisant pénétrer une bougie allumée, elle s'y éteindra, même dans le cas où la quantité d'acide carbonique serait insuffisante pour produire l'asphyxie. Il faudra assainir l'air, soit en neutralisant l'acide carbonique par un peu d'ammoniaque, soit en renouvelant l'air au moyen d'un ventilateur puisant l'air près du sol de la cave ou à l'aide d'un fourneau bien enflammé, dont la combustion sera entretenue par de l'air appelé du fond de la cave par un tuyau aboutissant sous la grille.

La production de l'acide carbonique dans la respiration peut se démontrer en faisant passer les gaz qui sortent des poumons dans un tube de verre plongé dans de l'eau de chaux. On voit la dissolution se troubler très-rapidement. L'air ordinaire n'aurait produit le même effet qu'au bout d'un temps bien plus long.

Si la proportion d'acide carbonique qui existe dans l'air n'augmente pas malgré la quantité énorme de ce gaz que fournissent les sources que nous venons d'énumérer, cela tient à ce que, sous l'influence des rayons solaires, les plantes en respirant agissent à l'inverse des animaux: leurs parties vertes décomposent l'acide carbonique, s'emparent du carbone et mettent l'oxygène en liberté. Pendant la nuit, les plantes exhalent, au contraire, de l'acide carbonique, mais ce dégagement est très-lent, tandis que la production de l'oxygène est rapide pendant le jour.

Une grande quantité de l'acide carbonique versé dans l'air en est encore enlevée par l'eau de pluie qui dissout ce gaz. Cette eau ainsi chargée d'acide carbonique dissout les carbonates, les phosphates, la silice, et devient propre à entretenir la vie des végétaux et des animaux.

230. **Préparation.** — 1° Dans les *laboratoires*, on prépare l'acide carbonique en traitant le marbre ou la craie par un acide énergique, comme l'acide chlorhydrique, par exemple. La réaction se produit dans un appareil (*fig.* 122) semblable à celui qui sert à la préparation de l'hydrogène. Le marbre est introduit en petits fragments; on remplit ensuite le flacon à moitié d'eau et on verse l'acide par petites portions dans le tube droit. Il se produit immédiatement une vive effervescence et le gaz se dégage par le tube abducteur. On le recueille sur la cuve à eau :

$$CaO\,CO^2 + HCl = CO^2 + CaCl + HO.$$

L'acide chlorhydrique, plus fixe que l'acide carbonique, chasse ce gaz et forme avec la chaux du chlorure de calcium et de l'eau.

2° Dans *l'industrie*, on emploie l'acide sulfurique et la craie pour préparer l'acide carbonique destiné à la fabrication de l'eau de seltz, mais il faut alors agiter constamment le mélange, parce que sans cela le sulfate de chaux, qui est très-peu soluble, encroûterait les morceaux de craie et arrêterait la réaction.

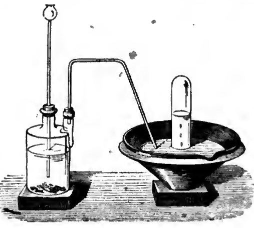


Fig. 122. — Préparation de l'acide carbonique.

3° Dans les *ménages*, on prépare l'eau de seltz à l'aide du bicarbonate de soude et de l'acide tartrique. Cet acide est un corps solide qui ne réagit qu'en présence de l'eau ; on n'aura donc pas à craindre les accidents que pourrait occasionner, en se répandant, un acide liquide comme l'acide chlorhydrique ou l'acide sulfurique.

231. **Usages**. — L'acide carbonique est employé pour la fabrication de l'eau de Seltz artificielle et des limonades gazeuses. Il rend les vins mousseux.

Dans la nature, l'eau chargée d'acide carbonique dissout le carbonate de chaux qui sert à la nutrition des plantes, ou qui, transporté dans l'Océan, fournira aux mollusques et aux animaux inférieurs les matériaux nécessaires à la sécrétion de leur enveloppe solide.

OXYDE DE CARBONE (CO).

Équiv. en poids = 14
Équiv. en vol. = 2^{vol}

L'oxyde de carbone a été découvert par Priestley, qui l'obtint en chauffant un mélange de charbon et d'oxyde de zinc.

232. **Propriétés physiques**. — C'est un gaz incolore, inodore et insipide.

Sa densité est 0,967. Il est peu soluble dans l'eau et n'a pu être liquéfié.

233. **Propriétés chimiques**. — L'oxyde de carbone est un corps neutre; il n'agit ni sur la teinture de tournesol, ni sur l'eau de chaux.

Il est indécomposable par la chaleur. Il brûle au contact de l'air avec une flamme bleue caractéristique, en donnant de l'acide carbonique reconnaissable à son action sur l'*eau de chaux*.

L'oxyde de carbone est un réducteur constamment utilisé dans l'industrie; il décompose la plupart des oxydes et les ramène à l'état métallique en passant lui-même à l'état d'acide carbonique. On verra plus loin que le charbon qu'on mêle à l'oxyde de fer dans les hauts fourneaux donne de l'oxyde de carbone qui, réagissant sur l'oxyde métallique, fournit le fer.

234. **Asphyxie par le charbon**. — On a longtemps attribué à l'acide carbonique les propriétés délétères des gaz qui se dégagent du charbon brûlant au contact de l'air. M. F. Leblanc a montré que l'oxyde de carbone est l'agent principal de l'asphyxie. C'est un gaz toxique, tandis que l'acide carbonique agit simplement en empêchant le dégagement de l'acide carbonique contenu dans le sang. Un centième d'oxyde de carbone suffit pour tuer un oiseau. Un chien périt plus rapidement dans une atmosphère contenant 3 pour 100 d'oxyde de carbone que dans une enceinte contenant 30 pour 100 d'acide carbonique.

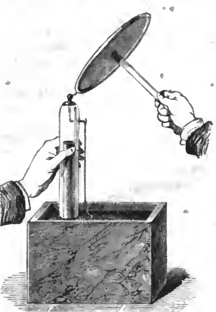


Fig. 123. — Analyse de l'oxyde de carbone.

L'oxyde de carbone est d'autant plus redoutable qu'il ne trahit sa présence par aucune odeur.

En général, on reconnaît la présence de l'oxyde de carbone par les maux de tête et les vertiges qu'il occasionne presque instantanément; il faut alors déterminer une ventilation rapide par l'ouverture des portes et des fenêtres. — On doit éviter d'allumer des charbons dans un appartement, il faut également se garder d'éteindre des charbons avec de l'eau, car il se produit alors de l'oxyde de carbone en même temps que de l'hydrogène.

235. **Composition**. — On introduit dans l'eudiomètre (*fig.* 123)

100 volumes d'oxyde de carbone et 100 volumes d'oxygène; après le passage de l'étincelle, le gaz se trouve réduit à 150 volumes. — Une dissolution de potasse absorbe alors 100 volumes de gaz acide carbonique, et laisse 50 volumes que l'on reconnaît être de l'oxygène. 100 volumes d'oxyde de carbone exigent donc 50 volumes d'oxygène pour se transformer en acide carbonique. Or, comme l'acide carbonique contient son volume d'oxygène, il en résulte que l'oxyde de carbone contient seulement ½ volume d'oxygène.

Si de la densité de l'oxyde de carbone. . .	0,9670
on retranche la demi-densité de l'oxygène. .	0,5528
il reste.	0,4142

Ce nombre représentera la demi-densité de la vapeur de carbone, d'après la loi de Gay-Lussac, et nous dirons alors que 2 volumes d'oxyde de carbone sont formés de 1 volume de vapeur de carbone et 1 volume d'oxygène sans condensation. L'acide carbonique contient 2 volumes d'oxygène et 1 volume de vapeur de carbone condensés en 2 volumes.

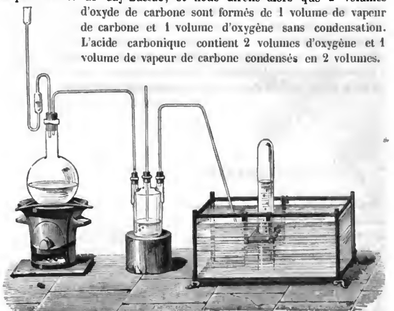


Fig. 124. — Préparation de l'oxyde de carbone.

256. **Production.** — L'oxyde de carbone n'existe pas dans la nature. Il se produit, comme nous l'avons vu, chaque fois que du charbon brûle en présence d'une quantité insuffisante d'oxygène. Il se produit également quand l'acide carbonique passe sur des charbons chauffés au rouge (223), ou quand on décompose par le charbon un oxyde difficilement

réductible, comme l'oxyde de zinc. — Les oxydes facilement réductibles par la chaleur, comme l'oxyde de cuivre, donnent au contraire de l'acide carbonique.

237. **Préparation.** — On prépare l'oxyde de carbone en chauffant à l'aide de quelques charbons un mélange d'acide oxalique avec 6 fois son poids d'acide sulfurique concentré, dans un ballon (*fig.* 124) muni d'un tube de sûreté et d'un tube à dégagement qui se rend dans un flacon laveur contenant de la potasse. L'acide sulfurique, très-avide d'eau, s'empare de celle de l'acide oxalique, qui, ne pouvant exister anhydre à cette température, se décompose en volumes égaux d'oxyde de carbone et d'acide carbonique. Ce dernier gaz est en grande partie absorbé par la potasse du flacon laveur, mais il s'en dégage toujours un peu avec l'oxyde de carbone :

$$C^2O^3, 3HO + SO^3, HO = CO + CO^2 + SO^3, 4HO.$$

238. **Usages.** — C'est surtout comme réducteur que l'oxyde de carbone est utilisé dans la métallurgie : le charbon, mêlé aux minerais, se transforme d'abord en acide carbonique au contact de l'oxygène en excès. Cet acide carbonique, rencontrant du charbon chauffé au rouge, se décompose en oxyde de carbone, qui, réagissant sur l'oxyde métallique, le réduit en se transformant de nouveau en acide carbonique.

COMPOSÉS HYDROGÉNÉS DU CARBONE.

239. **Propriétés générales.** — Le carbone ne se combine directement avec l'hydrogène, que sous l'influence de l'arc voltaïque d'une pile d'environ 40 éléments de Bunsen. Il se produit alors un composé que M. Berthelot a reconnu être l'acétylène (C^4H^2).

On connaît un grand nombre de carbures d'hydrogène naturels qui existent tout formés dans les végétaux. Il s'en produit d'ailleurs dans la décomposition des matières organiques, soit à la température ordinaire, soit à une température élevée.

Tous les carbures d'hydrogène sont décomposables par la chaleur en carbone qui se dépose, et en hydrogène qui se dégage. Tous brûlent avec une flamme assez éclairante.

La plupart de ces carbures seront étudiés en chimie organique; nous n'examinerons ici que le protocarbure d'hydrogène, C^2H^4, et le bicarbure, C^4H^4.

PROTOCARBURE D'HYDROGÈNE (C^2H^4).

Équiv. en poids = 16
Équiv. en vol. = 4^{vol}

240. **Propriétés physiques.** — Ce gaz, appelé aussi *gaz des marais*, parce qu'il se dégage spontanément de la vase des eaux stagnantes, est incolore, inodore, et insipide.

Sa densité est 0,559 ; par suite, le poids d'un litre de ce gaz est 1^{gr}, 293 × 0,559 = 0^{gr}, 727. Il est très-peu soluble dans l'eau. On n'a pu le liquéfier.

241. **Propriétés chimiques.** — Le protocarbure d'hydrogène brûle avec une flamme pâle, en donnant de l'eau et de l'acide carbonique :

$$C^2H^4 + 8O = 2CO^2 + 4HO.$$

Un mélange de 4 volumes de protocarbure et 8 volumes d'oxygène secs détone au contact d'une bougie, avec une violence telle, que le flacon est généralement brisé :

Le chlore agit également sur le protocarbure d'hydrogène. Le mélange de 4 volumes de protocarbure et de 8 volumes de chlore secs détone sous l'influence des rayons solaires, et produit de l'acide chlorhydrique et du carbon :

$$C^2H^4 + 4Cl = 4HCl + 2C.$$

Une bougie enflammée déterminerait la même réaction.

242. **Composition.**—On détermine la composition du protocarbure d'hydrogène en introduisant dans l'eudiomètre à mercure (*fig.* 125) 100 volumes de ce gaz avec 300 volumes d'oxygène. Après le passage de l'étincelle, on voit de l'eau ruisseler sur les parois, et il reste 200 volumes de gaz. Un fragment de potasse introduit alors dans les 200 volumes les réduit à 100; elle a donc absorbé 100 volumes d'acide carbonique; le reste est de l'oxygène. Comme 100 volumes



Fig. 125. — Analyse du protocarbure d'hydrogène.

d'acide carbonique contiennent 50 volumes de vapeur de carbone et 100 volumes d'oxygène, il faut que 100 volumes de ce dernier élément aient été employés à former de l'eau avec 200 volumes d'hydrogène. On en peut donc conclure que les 100 *volumes de protocarbure étaient formés de* 50 *volumes de vapeur de carbone et de* 200 *volumes d'hydrogène* (ou 4 volumes contiennent 2 volumes de vapeur de carbone et 8 volumes d'hydrogène condensés en 4 volumes).

On vérifie ces résultats par la considération des densités :

Si à la demi-densité de la vapeur de carbone	0,4142
on ajoute 2 fois la densité de l'hydrogène.	0,1384
on obtient à peu près la densité du protocarbure.	0,5526

243. **État naturel.** — Le protocarbure d'hydrogène se forme dans la décomposition spontanée des matières organiques au fond de la vase des marais et de toutes les eaux stagnantes.

Il se dégage du sol dans plusieurs contrées, où on peut l'enflammer; il brûle alors d'une manière continue, et peut être utilisé, soit pour les usages domestiques, soit pour la fabrication de la chaux et des poteries.

On connaît des sources de cette nature dans le département de l'Isère, en Italie, en Angleterre, en Crimée, en Perse, et au Mexique.

Le protocarbure d'hydrogène existe encore sous forme de petites bulles emprisonnées sous une pression considérable dans les blocs de sel gemme.

Il se dégage enfin et très-abondamment dans quelques mines de houille; se répandant alors dans l'air, il produit des mélanges détonants, qui s'enflamment au contact de la lampe des mineurs et produisent des explosions terribles. Les ouvriers, violemment jetés contre les parois de la mine, périssent en grand nombre dans ces explosions, qu'ils désignent sous le nom de *feu grisou*.

244. **Préparation.** — 1° On obtient du protocarbure d'hydrogène en agitant avec un bâton la vase des marais et recueillant les bulles qui se dégagent dans un flacon rempli d'eau, renversé et muni d'un large entonnoir (*fig.* 126). Ce gaz n'est pas pur; il contient un peu d'hydrogène libre, d'azote, d'oxygène et d'acide carbonique. On peut le débarrasser de l'oxygène par le phosphore et de l'acide carbonique par la potasse. Les deux autres gaz restent dans le mélange.

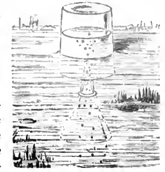


Fig. 126. — Extraction du gaz des marais.

2° On obtient le protocarbure d'hydrogène bien pur en se fondant sur la propriété que possède le vinaigre ou acide acétique de pouvoir se décomposer en protocarbure et en

acide carbonique. La formule qui représente cette réaction est la suivante :

$$C^4H^4O^4 = C^2H^4 + 2CO^2.$$

Pour obtenir cette décomposition, il suffirait de faire passer l'acide en vapeur sur de la mousse de platine légèrement chauffée. On la détermine plus facilement en utilisant l'influence des alcalis, qui s'emparent de l'acide carbonique et laissent dégager le protocarbure. L'opération se fait en chauffant dans un petit ballon (*fig.* 127), un mélange intime de 1 partie d'acétate de soude fondu avec 4 parties de chaux sodée (obtenue en calcinant ensemble de la chaux vive avec moitié de son poids de soude caustique). La réaction qui se produit est la suivante :

$$NaO, C^4H^3O^3 + NaO, HO = C^2H^4 + 2(NaO, CO^2).$$

La chaux n'intervient que pour empêcher la fusion de la soude qui attaquerait le verre. On a longtemps employé, au lieu de chaux sodée, de la baryte, qui jouait le même rôle que la soude.

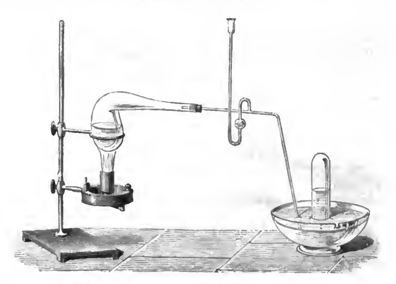


Fig. 127. — Préparation du protocarbure d'hydrogène.

245. **Usages.** — Le protocarbure est utilisé, comme nous l'avons dit, lorsqu'il se dégage du sol, pour la cuisson des poteries. Il se trouve en grande quantité dans le gaz de l'éclairage, comme on le verra plus loin.

BICARBURE D'HYDROGÈNE ($C^4H^4 = 28$).

Équiv. en poids = 28
Équiv. en vol. = 4^{vol}

Il est souvent appelé *gaz oléfiant*, parce qu'il donne en se combinant avec le chlore une matière huileuse appelée *liqueur des Hollandais*.

246. **Propriétés physiques.** — Gaz incolore, d'une odeur légèrement empyreumatique, sans saveur.

Sa densité est 0,97; un litre de ce gaz pèse $1^{gr},293 \times 0,97 = 1^{gr},26$.

L'eau en dissout le sixième de son volume à la température ordinaire. L'alcool en dissout 3 fois son volume dans les mêmes conditions; l'éther en dissout encore davantage.

Faraday a liquéfié le bicarbure d'hydrogène sous l'influence simultanée d'une forte pression et du froid produit par un mélange d'acide carbonique solide et d'éther. On n'a pas encore pu le solidifier.

247. **Propriétés chimiques.** — Le bicarbure d'hydrogène se décompose sous l'influence de la chaleur ou d'une série d'étincelles; il donne de l'hydrogène, du charbon et du protocarbure.

Il brûle au contact de l'air avec une flamme blanche très-éclairante, en produisant de l'eau et de l'acide carbonique. On a en même temps un dépôt de charbon si l'ouverture de l'éprouvette ne laisse pas arriver l'air assez rapidement.

$$C^4H^4 + 12O = 4HO + 4CO^2.$$

Un mélange de 4 volumes de bicarbure avec 12 volumes d'oxygène détone avec une violence extrême, et le flacon est toujours brisé. Aussi ne doit-on faire cette expérience qu'après avoir entouré le flacon d'un linge épais.

Le *chlore* donne, en agissant sur le bicarbure, des produits qui varient suivant la température à laquelle on opère :

1° Dans une grande éprouvette à pied pleine d'eau et renversée sur la cuve à eau, on fait passer d'abord du bicarbure jusqu'au *tiers* de la hauteur, on achève ensuite de remplir rapidement avec du chlore. L'éprouvette, bouchée avec une lame de verre, est alors retournée; le chlore, plus lourd, descend et se mélange au bicarbure; on approche immédiatement une bougie allumée de l'orifice de l'éprouvette, le gaz prend feu et on voit une flamme rouge se propager régulièrement de haut en bas, accompagnée d'un nuage noir et épais de charbon qui se dépose. La réaction qui se produit est la suivante :

$$C^4H^4 + 4Cl = 4C + 4HCl.$$

2° A la température ordinaire, le chlore et le bicarbure d'hydrogène se

combinent à volumes *égaux;* la combinaison se fait lentement à la lumière diffuse, rapidement à la lumière solaire. Il se forme un liquide huileux d'une odeur éthérée, d'une saveur sucrée, connu sous le nom d'*huile des Hollandais*. La réaction est exprimée par la formule suivante :

$$C^4H^4 + 2\,Cl = C^4H^4Cl^2.$$

Pour réaliser l'expérience, on fait passer d'abord le bicarbure dans une grande cloche sur la cuve à eau, et on achève de la remplir avec le chlore. La cloche est ensuite placée sur un vase plat en verre (cristallisoir), où l'on verse de temps en temps un peu d'eau pour remplacer celle qui monte dans la cloche. Le gaz disparaît peu à peu, et la surface de l'eau se couvre de gouttelettes huileuses, qui grossissent et tombent au fond du vase.

248. **Composition.** — On fait passer dans l'eudiomètre à mercure (*fig.* 128) 100 volumes de bicarbure et 400 volumes d'oxygène (l'excès d'oxygène empêche la rupture de l'appareil). Après le passage de l'étincelle, on voit de l'eau ruisseler sur les parois et il reste 300 volumes de gaz. Un fragment de potasse introduit alors en absorbe 200 volumes. Le reste est de l'oxygène. Comme 200 volumes d'acide carbonique contiennent 100 volumes de vapeur de carbone et 200 volumes d'oxygène, il en résulte que 100 volumes d'oxygène ont été employés à former de l'eau, et que, par conséquent, 100 volumes de bicarbure sont formés de 100 volumes de vapeur de carbone et de 200 volumes d'hydrogène (ou 4 volumes de bicarbure sont formés de 4 volumes de vapeur de carbone et 8 volumes d'hydrogène).

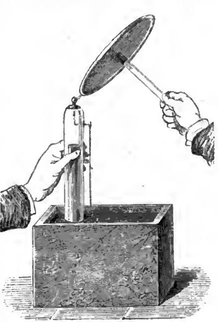


Fig. 128.
Analyse du bicarbure d'hydrogène.

On vérifie ces résultats par la considération des densités.

Si à la densité de la vapeur de carbone. . . .	0,8284
on ajoute 2 fois la densité de l'hydrogène. . .	0,1384
on obtient la densité du bicarbure.	0,9668

249. **Préparation.** — On l'obtient en chauffant dans un ballon de l'alcool avec de l'acide sulfurique concentré (*fig.* 129); pour éviter le boursoufflement qui ne manquerait pas de se produire au milieu de la réaction, on met au fond du ballon, comme l'a conseillé M. Wöhler, un peu de sable qui rend la décomposition plus régulière. L'alcool, sous l'influence de l'acide sulfurique avide d'eau, se dédouble :

$$C^4H^6O^2 = 2HO + C^4H^4.$$

Il faut élever la température jusqu'à 160° pour que cette réaction se produise; au-dessous de cette température, il se formerait de l'éther. En même temps que le bicarbure d'hydrogène se dégage, il se produit un peu d'acide carbonique et d'acide sulfureux provenant de l'action du bicarbure sur l'acide sulfurique.

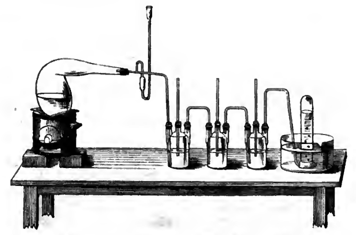


Fig. 129. — Préparation du bicarbure d'hydrogène.

Les deux premiers flacons laveurs contenant de la potasse retiennent les acides sulfureux et carbonique ; un dernier flacon contenant de l'acide sulfurique retient l'éther et la vapeur d'eau.

250. **Usages.** — Ce gaz, qui se produit dans la décomposition de la houille, existe en petite quantité dans le gaz de l'éclairage.

GAZ DE L'ÉCLAIRAGE.

251. **Historique.** — L'éclairage au gaz est dû à un ingénieur français, Philippe Lebon. Il annonça, le premier, en 1786, qu'on pouvait obtenir, par la distillation du bois ou de la houille, un gaz combustible propre à donner une belle lumière. Ce procédé fut appliqué par Murdoch,

en Angleterre, vers 1802, dans les ateliers de construction de Watt et Bolton.

L'éclairage public au gaz fut appliqué à Londres en 1810. Vers 1812, on éclaira, à Paris, l'hôpital Saint-Louis. Ce n'est qu'en 1820, que nos rues commencèrent à être éclairées la nuit par le gaz de la houille.

252. **Composition.** — Le gaz provenant de la distillation de la houille est surtout formé de protocarbure d'hydrogène mêlé de bicarbure; on y trouve aussi, mais en très-petite quantité, de l'hydrogène libre, de l'azote, de l'oxyde de carbone, de l'acide sulfhydrique, du sulfure de carbone et du sulfhydrate d'ammoniaque, qui lui communiquent une odeur désagréable. La présence de ces derniers composés tient à ce que la houille contient, outre le carbone et le goudron, quelques matières azotées et du bisulfure de fer ou pyrite jaune d'or.

100 kilogrammes de houille à longue flamme fournissent, en moyenne, 25 mètres cubes de gaz.

253. **Préparation.** — On chauffe la houille dans des cornues de terre (*fig.* 130) ou de fonte au rouge cerise (une température plus élevée, en décomposant les carbures, donnerait un dépôt de charbon et un gaz doué d'un moindre pouvoir éclairant).

Le gaz qui se dégage se rend par un tube partant de la partie antérieure de la cornue dans un long cylindre appelé ***barillet***. Ce cylindre, qui reçoit le gaz de toutes les cornues, est à moitié rempli d'eau; un trop-plein permet d'y maintenir un niveau constant. Les tubes venant des cornues plongent de 1 centimètre dans l'eau; de cette façon, il n'y a jamais communication entre le gaz combustible et l'air qui peut rentrer dans la cornue au moment où on remplace la houille. Après avoir abandonné dans le barillet les produits les plus facilement liquéfiables, le gaz se rend dans les appareils, qui lui font subir d'abord une épuration ***physique*** pour achever la condensation des produits qui pourraient, en se déposant ultérieurement, obstruer les tuyaux, puis une épuration ***chimique*** destinée à le débarrasser des produits qui le rendraient trop insalubre.

L'épuration physique se fait dans le ***réfrigérant***. Cet appareil se compose de plusieurs larges tubes en U renversés, dont les extrémités aboutissent dans une caisse qui reçoit les produits abandonnés par le gaz. C'est là que se condensent la vapeur d'eau, les goudrons et la plus grande partie des sels ammoniacaux. A la suite de ces tubes se trouve un cylindre de fonte séparé en deux compartiments et rempli de coke; le gaz arrivant à la partie supérieure de l'un des compartiments laisse, en filtrant à travers les interstices, une nouvelle quantité de goudron et de sels ammoniacaux.

L'épuration chimique s'obtient en faisant passer le gaz dans des caisses garnies de claies superposées sur lesquelles on a répandu un mélange de

sulfate de chaux et de sesquioxyde de fer obtenu en précipitant le sulfate

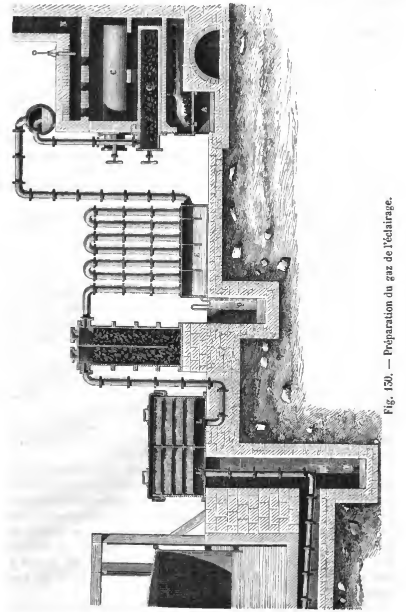


Fig. 150. — Préparation du gaz de l'éclairage.

de fer en dissolution concentrée par de la chaux, et exposant le mélange

au contact de l'air. L'ammoniaque reste à l'état de sulfate d'ammoniaque, l'acide carbonique à l'état de carbonate de chaux; quant à l'acide sulfhydrique, il donne, au contact du sesquioxyde de fer, de l'eau, du soufre et du sulfure de fer.

Le gaz ainsi épuré se rend dans une grande cloche en tôle appelée gazomètre, où il s'accumule pour être ensuite distribué aux différents becs

SULFURE DE CARBONE.

Équiv. en poids = 38
Équiv. en vol. = 2^{vol}

254. **Propriétés physiques**. — C'est un liquide incolore, très-mobile, d'une odeur fétide.

Sa densité est 1,263. Il bout à 45°. La densité de sa vapeur est 2,645. Quand on l'évapore dans le vide, il produit un froid de — 60°.

Il dissout le soufre et le phosphore qui peuvent ensuite se déposer sous forme de cristaux par l'évaporation lente du liquide.

Il est insoluble dans l'eau, et soluble dans l'alcool et l'éther.

255. **Propriétés chimiques**. — Le sulfure de carbone est indécomposable par la chaleur. Il est facilement combustible. Il brûle avec une flamme bleue en donnant de l'acide sulfureux et de l'acide carbonique.

$$CS^2 + 6\,O = CO^2 + 2\,SO^2.$$

La vapeur de sulfure de carbone produit avec l'oxygène ou l'air des mélanges qui détonent avec violence.

Les métaux décomposent le sulfure de carbone en donnant un sulfure et du charbon.

Le sulfure de carbone joue le rôle d'*acide* vis-à-vis des sulfures alcalins; on obtient ainsi des *sulfocarbonates*, analogues aux carbonates. De là le nom d'acide *sulfocarbonique* donné à ce corps.

Exemples : Sulfocarbonate de sulfure de potassium KS,CS^2.
— — de sodium NaS,CS^2.

256. **Composition** — On analyse le sulfure de carbone en le décomposant au rouge par un oxyde métallique. On trouve ainsi qu'il contient 1 volume de vapeur de soufre et $\frac{1}{2}$ volume de vapeur de carbone. En effet :

Si à la densité de la vapeur de soufre.	2,22
on ajoute la demi-densité de vapeur du carbone.	0,414
on obtient à peu près la densité de vapeur du sulfure. . .	2,634

257. **Préparation.** — On l'obtient en faisant passer de la vapeur de soufre sur du charbon chauffé au rouge dans un tube de porcelaine. Ce tube, placé dans un fourneau à réverbère incliné (*fig.* 131), contient de la braise concassée. Son extrémité supérieure est fermée à

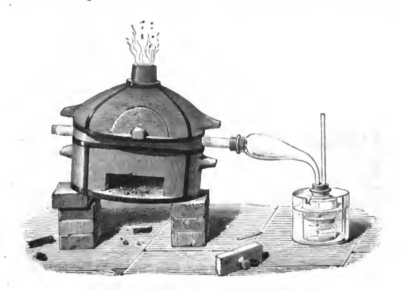


Fig. 131. — Préparation du sulfure de carbone.

l'aide d'un bouchon qu'on peut ôter ou remettre à volonté; l'extrémité inférieure est munie d'une allonge recourbée qui pénètre dans un récipient contenant de l'eau et refroidi. Quand le tube est porté au rouge, on introduit un morceau de soufre et on rebouche. Le soufre fond, coule vers la partie chaude, et, se vaporisant, rencontre le charbon, avec lequel il donne du sulfure de carbone qui va se condenser dans l'allonge et dans l'eau du flacon. Il se dégage par le tube du récipient des gaz étrangers qui proviennent de l'hydrogène du charbon et de l'eau du bouchon.

Le sulfure de carbone qui s'est rassemblé au fond de l'eau est coloré par un peu de soufre qu'il tient en dissolution. On le sépare de l'eau, puis, après l'avoir desséché en le mêlant avec un peu de chlorure de calcium, on le distille au bain-marie en ayant soin que les vapeurs de sulfure ne puissent pas se dégager dans le voisinage du fourneau.

Dans l'industrie, le charbon est contenu dans un cylindre vertical en fonte (*fig.* 132); une tubulure inférieure permet d'introduire peu à peu le soufre. La tubulure latérale supérieure communique avec un récipient

où le soufre en excès vient se déposer. Le sulfure de carbone se rend dans le réfrigérant formé de trois vases cylindriques superposés, entourés d'eau froide. Le liquide condensé peut s'écouler par un tube placé au bas de l'appareil.

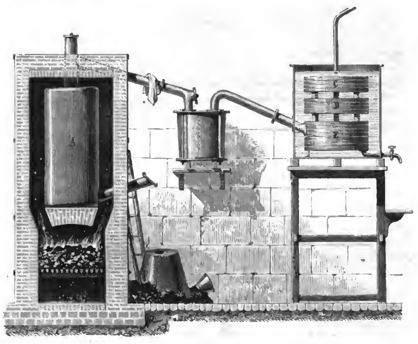


Fig. 132. — Préparation industrielle du sulfure de carbone.

258. **Usages.** — Le sulfure de carbone sert principalement à la vulcanisation du caoutchouc. Pour cela on fait dissoudre du soufre dans le sulfure et on trempe dans cette dissolution le caoutchouc auquel on veut communiquer la propriété de garder son élasticité, même aux plus basses températures.

CYANOGÈNE. ($C^2Az = Cy$).

Équiv. en poids = 26
Équiv. en vol. = 2^{vol}

259. **Historique.** — Le *cyanogène*, ainsi nommé parce qu'il existe comme partie essentielle dans le bleu de Prusse, a été obtenu en 1814 par Gay-Lussac. Ce fut le premier exemple d'un corps composé jouant le rôle d'un corps simple dans ses combinaisons. Il se conduit, en effet, vis-

à-vis de l'hydrogène et des métaux, comme un radical analogue au chlore, au brôme et à l'iode.

260. **Propriétés physiques.** — Le cyanogène est un gaz incolore d'une odeur vive et pénétrante, rappelant celle du kirsch, d'une saveur amère. Sa densité est 1,806.

L'eau en dissout 4 fois son volume à la température ordinaire.

On peut le liquéfier à — 20° sous la pression de 4 atmosphères, ou à la pression ordinaire à la température produite par l'évaporation rapide de l'acide sulfureux. Le cyanogène liquéfié produit en s'évaporant un froid capable d'amener à l'état solide la partie non vaporisée.

261. **Propriétés chimiques.** — Le cyanogène est un corps combustible; il brûle avec une flamme pourpre caractéristique en se transformant en azote et acide carbonique :

$$C^2 Az + 4 O = 2 CO^2 + Az.$$

Il forme avec l'oxygène un mélange détonant.

Le cyanogène ne se combine directement avec aucun métalloïde, quoiqu'il puisse former avec la plupart d'entre eux des combinaisons définies.

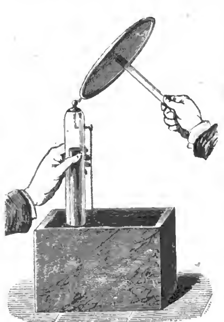


Fig. 133. — Analyse du cyanogène.

Il s'unit directement avec le potassium et le sodium, indirectement avec tous les autres métaux. Les cyanures sont isomorphes des chlorures, bromures et iodures.

La dissolution du cyanogène dans l'eau s'altère rapidement et se colore en brun; elle contient alors du carbonate, du cyanhydrate et de l'oxalate d'ammoniaque.

262. **Composition.** — On introduit dans l'eudiomètre à mercure (*fig.* 133) 100 volumes de cyanogène et 250 volumes d'oxygène; l'étincelle passant dans ce mélange donnerait une combustion incomplète; pour arriver à un résultat exact il faut ajouter un mélange détonant d'oxygène et d'hydrogène obtenu par la décomposition de l'eau par la pile. On trouve qu'après le passage de l'é-

tincelle il reste encore 350 volumes ; il n'y a donc pas eu de changement. Une dissolution de potasse introduite dans l'eudiomètre absorbe 200 volumes d'acide carbonique. Le phosphore absorbe 50 volumes d'oxygène, et il reste en définitive 100 volumes d'azote. Comme, d'ailleurs, 200 volumes d'acide carbonique contiennent 100 volumes de vapeur de carbone, on en doit conclure que 100 volumes de cyanogène sont formés de 100 volumes de vapeur de carbone et de 100 volumes d'azote condensés en 100 volumes. C'est le premier exemple de corps se combinant à volumes égaux avec contraction.

La considération des densités conduit aux mêmes résultats :

En effet, si à la densité de la vapeur de carbone. 0,8284
on ajoute la densité de l'azote. 0,972

on obtient un nombre peu différent de la densité du cyanogène. 1,8004

On détermine plus rigoureusement la composition de ce corps par une analyse organique.

263. **État naturel. — Production.** — Le cyanogène n'existe pas isolé, il se forme chaque fois que le carbone et l'azote libres ou à l'état naissant se trouvent, à une température convenable, en présence d'un alcali ou d'un carbonate alcalin. — C'est ainsi qu'on obtient du cyanure de potassium, quand on calcine des matières azotées, telles que du sang, des muscles ou de la corne avec du carbonate de potasse.

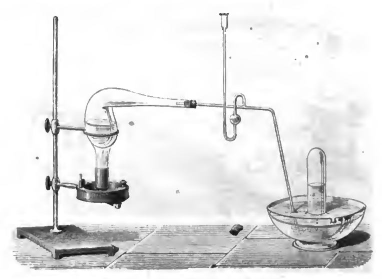


Fig. 134. — Préparation du cyanogène.

On produit également un cyanure quand on fait passer un courant

d'azote ou d'air sur des charbons imprégnés de potasse ou sur un mélange de carbonate de baryte et de charbon.

L'ammoniaque passant sur des charbons chauffés au rouge donne du cyanhydrate d'ammoniaque.

264. **Préparation.** — On obtient le cyanogène en chauffant dans une petite cornue de verre du cyanure de mercure bien sec (*fig.* 134). Ce corps se décompose en mercure qui tapisse le col de la cornue, et en cyanogène qu'on recueille sur la cuve à mercure. Il reste dans la cornue une matière solide brune qui a la même composition que le cyanogène et qu'on appelle le *paracyanogène*.

ACIDE CYANHYDRIQUE ($HC^2Az = HCy$).

Équiv. en poids = 27
Équiv. en vol. = 4^{vol}

265. **Propriétés.** — L'acide cyanhydrique, découvert par Scheele, a été appelé acide *prussique*, parce qu'il existe dans le bleu de Prusse. C'est un liquide incolore, d'une odeur d'amandes amères. Sa densité est 0,69.

Il bout à 26°,5 et se solidifie à — 15°.

C'est le plus violent de tous les poisons. Son action est instantanée.

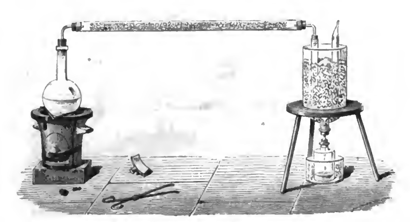


Fig. 135. — Préparation de l'acide cyanhydrique.

L'acide cyanhydrique ne se conserve pas. Il brûle au contact de l'air avec une flamme pourpre en donnant de l'acide carbonique, de l'eau et de l'azote :

$$HC^2Az + 5O = HO + 2CO^2 + Az.$$

Le chlore le décompose en acide chlorhydrique et chlorure de cyanogène. Il ressemble à l'acide chlorhydrique par ses propriétés chimiques.

266. **Préparation.** — On le prépare en chauffant dans un petit ballon de verre (*fig.* 135) du cyanure de mercure et de l'acide chlorhydrique :

$$\text{Hg Cy} + \text{H Cl} = \text{Hg Cl} + \text{H Cy}.$$

La vapeur, après avoir passé sur du marbre, qui la débarrasse de l'acide chlorhydrique entraîné, et sur du chlorure de calcium, qui retient l'eau, va se condenser dans un tube en U, entouré d'un mélange réfrigérant.

BORE (Bo).	SILICIUM (Si).
Équiv. en poids = 11	Équiv. en poids = 21
Équiv. en vol. = »	Équiv. en vol. = »

Le bore et le silicium ont été découverts en 1808, le premier par Gay-Lussac et Thénard, le second par Berzelius. On ne les connaissait qu'à l'état de poussière amorphe jusqu'à l'époque où M. H. Sainte-Claire Deville (avec la collaboration de M. Wöhler pour le bore) a obtenu ces métalloïdes à l'état graphitoïde et à l'état cristallin.

267. **Propriétés physiques.** — Le bore et le silicium sont des corps solides, très-réfractaires, qui présentent de grandes analogies avec le carbone. Comme lui ils peuvent exister à trois états :

1° A l'*état amorphe*, ce sont des poussières vertes ou brunes;

2° A l'*état graphitoïde*, ils se présentent en lamelles hexagonales analogues au graphite;

3° A l'*état cristallin*, ils ont la forme d'octaèdres réguliers avec les mêmes modifications que le diamant.

Le bore cristallisé est presque aussi dur que le diamant; ce dernier corps a pu être usé par de la poussière de bore.

Le silicium fond au rouge blanc; le bore résiste à toutes les températures de nos fourneaux.

Comme le carbone, ces deux métalloïdes ne se dissolvent que dans un métal en fusion; le bore se dissout dans l'aluminium, le silicium se dissout dans l'aluminium et dans le zinc.

268. **Propriétés chimiques.** — De même que le charbon ordinaire, le bore et le silicium amorphes brûlent dans l'oxygène à une température peu élevée; à l'état graphitoïde ils résistent mieux à l'action de l'oxygène; enfin à l'état cristallin, ils ne brûlent qu'au rouge vif, et encore l'attaque n'est-elle que superficielle, parce qu'il se forme à la surface des cristaux une couche imperméable d'acide *borique* ou d'acide *silicique* fixes.

Le bore résiste comme le carbone à l'action de tous les acides; le silicium est attaqué par plusieurs d'entre eux.

ACIDE BORIQUE ($BoO^3 3HO$)

Équiv. en poids = 62
Équiv. en vol. = »

269. **Propriétés physiques.** — Ce corps se présente à l'état de paillettes cristallines, transparentes et incolores. Il est peu soluble à froid, beaucoup plus soluble à chaud. L'alcool le dissout mieux et brûle alors avec une flamme verte caractéristique.

Chauffé, l'acide borique perd son eau de cristallisation, puis fond au rouge en une masse *vitreuse* qui se volatilise au rouge blanc. Cette propriété a été utilisée par Ebelmen pour reproduire des pierres précieuses; l'alumine, dissoute dans l'acide borique fondu, cristallise par l'évaporation lente de cet acide chauffé dans un four à porcelaine et donne le corindon, etc.

270. **Propriétés chimiques.** — L'acide borique rougit faiblement le tournesol à froid; à l'ébullition, il le fait passer au rouge pelure d'oignon (Malagutti).

271. **État naturel et préparation.** — On trouve, dans certains lacs de l'Inde, du borate de soude ou *borax*. Ce sel traité par l'acide chlorhydrique à la température de l'ébullition, donne de l'acide borique qui cristallise par refroidissement. La réaction peut être représentée par la formule

$$NaO, BoO^3 + HCl + 2HO = NaCl + BoO^3, 3HO.$$

La plus grande quantité de l'acide borique actuellement employé vient de la Toscane, où il sort du sol par des crevasses appelées *suffioni*, avec de la vapeur d'eau et des gaz azote, acide carbonique, acide sulfhydrique, carbure d'hydrogène et hydrogène libre (Ch. Deville et F. Leblanc). On creuse autour de ces crevasses des bassins ou *lagoni*. L'eau agitée par la vapeur et les gaz qui se dégagent s'enrichit peu à peu; on la fait passer d'un premier bassin dans un second, puis dans un troisième, et on la concentre ensuite dans des cuves en plomb chauffées par d'autres *suffioni*. Les eaux ainsi obtenues laissent déposer de l'acide borique par refroidissement. Cet acide est impur, il contient jusqu'à 20 °/₀ de matières étrangères. Pour le purifier, on le traite par le carbonate de soude qui, le transforme en borax. Ce borax, purifié par plusieurs cristallisations, n'a plus besoin que d'être traité par l'acide chlorhydrique pour donner de l'acide borique pur.

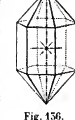
272. **Usages.** — La propriété que possèdent l'acide borique et le borax de dissoudre les oxydes métalliques les fait employer en bijouterie pour le décapage des métaux précieux que l'on veut souder.

SILICE OU ACIDE SILICIQUE (SiO^3).

Équiv. en poids = 45
Équiv. en vol. = »

273. **Propriétés physiques.** — Amorphe, c'est une poudre blanche insoluble, insipide, rude au toucher. Elle ne fond qu'au chalumeau à gaz oxygène et hydrogène. Sa densité est 2,2.

Cristallisée, elle raye le verre. Sa densité est 2,6. On l'appelle quartz ou cristal de roche (prismes hexagonaux terminés par des pyramides à six faces (*fig.* 136).


Fig. 136. Cristal de roche.

274. **Propriétés chimiques.** — L'acide silicique n'est attaqué que par l'acide fluorhydrique. La réaction représentée par la formule suivante est utilisée pour la gravure sur verre :

$$SiO^3 + 3\,HFl = SiFl^3 + 3\,HO.$$

Les alcalis en dissolution dissolvent la silice gélatineuse à froid, et la silice calcinée, à l'ébullition; le quartz est très-lentement attaqué.

Au rouge, les carbonates alcalins sont attaqués par l'acide silicique avec dégagement d'acide carbonique.

275. **État naturel.** — La silice constitue le quartz, le grès, le sable, la pierre meulière, le silex, l'agate. Il en existe dans les eaux courantes; on la trouve dans les jets d'eau chaude qui, sortant des fissures du sol en Islande, constituent les *geisers*, analogues aux *suffioni* de Toscane. Combinée avec les bases, elle entre dans un grand nombre de roches. On peut reproduire artificiellement la silice en versant un acide, l'acide chlorhydrique, par exemple, dans un silicate de soude en dissolution dans l'eau.

La silice et les silicates, comme l'acide borique et le borax, dissolvent les oxydes métalliques. Aussi le forgeron qui veut souder deux barres de fer a-t-il soin de les saupoudrer de sable, qui, dissolvant l'oxyde formé, laisse en contact parfait les deux surfaces métalliques à réunir.

CHAPITRE IX.

Chaleur de combinaison. — Flamme. — Effet des toiles métalliques.

CHALEUR DE COMBINAISON.

276. **Chaleur dégagée dans les combinaisons.** — Lavoisier est le premier qui ait cherché à mesurer la chaleur dégagée dans les

combinaisons. Rumford, Dulong, Despretz, et enfin MM. Fabre et Silbermannn ont repris ces déterminations. Nous extrairons quelques nombres du travail de ces derniers auteurs :

1gr d'hydrogène, en formant HO dans l'oxygène, dégage. . .	34460	calories.
1gr d'hydrogène, en formant HCl dans le chlore, dégage.. .	23780	—
1gr de charbon de bois, en formant CO^2 dans l'oxygène, dégage.	8080	—
1gr de graphite, en formant CO^2 dans l'oxygène, dégage. . .	7796	—
1gr de diamant, en formant CO^2 dans l'oxygène, dégage. . .	7770	—
1gr de phosphore ordinaire, en formant PhO^5 dans l'oxygène, dégage.	6750	—
1gr de phosphore amorphe, en formant PhO^5 dans l'oxygène, dégage.	5850	—
1gr de soufre natif, en formant SO^2 dans l'oxygène, dégage. .	2260	—
1gr de soufre amorphe, en formant SO^2 dans l'oxygène, dégage.	2180	—

Ce tableau montre que la quantité de chaleur dégagée par un corps en brûlant dépend de son état moléculaire : ainsi tandis que le phosphore ordinaire dégage 6750 calories, le même poids de phosphore amorphe n'en dégage que 5850. Pour passer de l'état ordinaire à l'état amorphe, chaque gramme de phosphore a donc dû dégager 900 calories. Le charbon et le soufre conduisent à des conclusions analogues.

Comme ces nombres ont été déterminés en cherchant l'élévation de température que ces combustions peuvent faire subir à un poids d'eau donné, ils ne représentent pas toujours uniquement la chaleur dégagée dans la combinaison. Ainsi le nombre 34460 représente non-seulement la quantité de chaleur dégagée par l'hydrogène en brûlant dans l'oxygène, mais aussi la quantité de chaleur qu'a cédée la vapeur d'eau en se liquéfiant ; au contraire, dans le nombre, 23780 il n'entre pas de chaleur de liquéfaction, puisque l'acide reste gazeux. Ces deux nombres ne sont donc pas immédiatement comparables.

FLAMME.

277. **Des flammes en général.** — La flamme est toujours le résultat de la combustion d'un gaz ou d'une vapeur : le charbon bien calciné, le fer, le cuivre et les métaux difficilement volatils brûlent sans flamme ; au contraire, l'hydrogène, le soufre et les métaux volatils, comme le zinc, brûlent avec flamme.

278. **Éclat des flammes.** — L'éclat de la flamme dépend des matières qui s'y trouvent. Quand elle ne contient pas de corps solide, la flamme est pâle, comme celle de l'hydrogène, du soufre, de l'oxyde de carbone. Au contraire, la présence des corps solides incandescents au milieu de la flamme lui donnent de l'éclat ; ainsi, le phosphore, le zinc

donnent des flammes brillantes, parce que l'acide phosphorique ou l'oxyde de zinc, solides, sont portés à l'incandescence. Si l'huile, la bougie, le gaz de l'éclairage brûlent avec éclat, c'est que, par suite de la combustion incomplète qui s'effectue au milieu de la flamme, il y a du carbone qui, mis en liberté, devient incandescent avant de brûler dans les parties extérieures. On peut démontrer l'existence du carbone libre dans la flamme en mettant au milieu d'elle une soucoupe froide, il se forme immédiatement un dépôt de noir de fumée. La flamme pâle de l'hydrogène devient très-brillante dès qu'on y introduit un corps solide, comme de la chaux vive, un fil de platine ou des brins d'amiante. D'un autre côté cette flamme pâle de l'hydrogène donne beaucoup plus de chaleur que la flamme brillante du phosphore; il n'y a donc pas de rapport entre le pouvoir éclairant et la température de deux flammes de nature différente.

279. **Composition des flammes.** — La flamme produite par la combustion d'un corps composé n'est pas homogène. Si nous examinons la flamme d'une bougie (*fig.* 137), nous constatons qu'elle présente trois couches distinctes : 1° dans son intérieur, tout autour de la mèche, un espace sombre *a*, où la température est peu élevée ; 2° autour de cet espace une enveloppe intermédiaire *b* brillante, qui constitue la partie éclairante de la flamme ; 3° enfin l'enveloppe extérieure *c*, mince, peu colorée, jaune vers le haut, bleue vers le bas en *d d'* ; c'est la partie la plus chaude



Fig. 137. Flamme d'une bougie.

Cette constitution de la flamme est facile à expliquer ; la matière fondue qui monte par capillarité dans la mèche est décomposée par la chaleur de la flamme. Les gaz combustibles qui en résultent constituent la partie obscure *a* de la bougie ; ils n'y brûlent pas, faute d'oxygène. — Dans la partie intermédiaire *b* la combustion commence, mais comme il y a excès de combustible, l'hydrogène brûle d'abord et porte à l'incandescence le charbon réduit, qui donne ainsi de l'éclat à la flamme. Dans l'enveloppe extérieure *c*, la combustion se complète au contact d'un excès d'oxygène; il y a donc là plus de chaleur que dans la couche intermédiaire, mais comme les produits de la combustion sont gazeux (acide carbonique et vapeur d'eau), la flamme y est peu brillante. La partie inférieure *d d'* de cette couche extérieure est bleue, parce qu'elle est formée par la combustion de l'oxyde de carbone et du protocarbure d'hydrogène, premiers produits de la décomposition de la bougie sous l'influence d'une température peu élevée.

On augmentera l'éclat et la chaleur des flammes en se servant des lampes à huile à double courant d'air et à cheminée de verre. La flamme conserve la constitution que nous avons indiquée, mais elle peut être considérée comme la réunion d'une série de flammes dont les mèches, placées au contact, forment un grand anneau. La cheminée de verre, qu'on peut abaisser ou élever, sert, par la position de sa partie rétrécie par rapport à la flamme, à régler le tirage; s'il est très-actif, c'est-à-dire si la partie étroite de la cheminée est descendue très-près du niveau de la mèche, la combustion sera elle-même très-active, mais comme les gaz brûleront presque au sortir de la mèche, la flamme sera peu étendue et peu éclairante. Si le tirage était trop faible, c'est-à-dire si la partie étroite de la cheminée était beaucoup au-dessus de la mèche, le cône s'allongerait. mais la température serait trop peu élevée pour maintenir le charbon à l'incandescence, la flamme deviendrait fumeuse et peu éclairante. On aura le maximum d'éclat en réglant le tirage de manière à donner à la couche brillante le plus d'étendue possible, tout en déterminant une combustion compléte.

La flamme du gaz de l'éclairage a la même constitution, quelle que soit d'ailleurs la forme des becs par lesquels sort le gaz.

280. Chalumeau. — On augmente beaucoup la chaleur de la flamme d'une bougie en dirigeant dans son intérieur un courant d'air. Il active la combustion des gaz hydrocarbonés, et brûle les corps solides qui, pour se maintenir à l'incandescence, absorbaient une partie de la chaleur. La flamme ainsi modifié peut être employée pour faire de petites soudures ou pour produire des phénomènes d'oxydation ou de réduction.

Le courant d'air est amené par un petit instrument appelé *chalumeau*. Cet instrument consiste (*fig.* 138) en un tube conique AB, muni d'une embouchure en ivoire ou en corne F. Son extrémité B pénétre dans une chambre C, destinée à condenser l'humidité de l'air insufflé. Le bout du tube latéral D, par lequel l'air s'échappe, est recouvert à frottement par un bec en platine qui présente une très-petite ouverture E. Il faut un peu d'habitude pour souffler avec la bouche de manière à obtenir un courant d'air *continu* et d'une vitesse convenable : si l'on souffle trop doucement, l'effet est insuffisant; si l'on souffle trop fort, l'excès d'air refroidit la flamme et peut même l'éteindre. Quand le courant d'air est convenable,il fait infléchir la flamme,

F
A
E
B
C
E D

Fig. 138.
Chalumeau.

qui se termine alors par un cône incliné présentant trois couches distinctes *a*, *b*, *c* (*fig.* 139). La couche intérieure est bleue vers son extrémité, la combustion y est complète; elle présente un maximum de température vers sa pointe, où il n'y a plus excès d'air. La zone brillante *b* est encore très-chaude, mais il y a excès de carbone. Enfin, la couche extérieure et pâle *c* présente encore une combustion complète avec maximum de température à la pointe *d*.

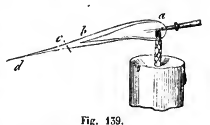


Fig. 139.
Flamme modifiée par le chalumeau.

Pour faire une soudure, on placera la pièce dans la pointe bleue de la couche intérieure.—Si on veut réduire un composé oxygéné, on le placera un peu au delà de ce cône bleu, au commencement de la zone brillante; cette partie constitue le *feu de réduction*. — Pour oxyder ou *griller* les corps, on les chauffera à l'extrémité *d* de la couche extérieure, où il y a à la fois température élevée et excès d'air, c'est le *feu d'oxydation*.

On obtient des effets plus intenses en remplaçant l'air insufflé des poumons par un courant de gaz oxygène, on parvient alors à fondre les corps les plus réfractaires.


Fig. 140. — Effet des toiles métalliques sur les flammes.

EFFETS DES TOILES MÉTALLIQUES.

281. Quand on refroidit d'une manière quelconque les gaz qui brûlent dans une flamme, on peut faire cesser la combustion.

Si, par exemple, l'air est mélangé d'une trop forte quantité d'un gaz inerte comme l'acide carbonique, ce gaz prend pour lui une partie de la chaleur dégagée par la combustion, et on voit la bougie s'éteindre, bien que les animaux y puissent encore respirer.

L'insufflation d'une trop grande quantité d'air ou d'oxygène éteint de même une bougie, par suite de l'abaissement de température qui résulte de l'absorption d'une partie de la chaleur par le gaz en excès.

Davy a trouvé dans la conductibilité des toiles métalliques un moyen très-efficace pour refroidir les gaz combustibles d'une flamme et faire cesser leur combustion. Si on abaisse une toile métallique sur une flamme (*fig.* 140), on aperçoit à travers la toile un cône tronqué présentant les trois couches des flammes ordinaires, mais la lumière s'arrête au-dessous de la toile ; les gaz et le carbone en excès traversent les mailles, mais leur température a été assez abaissée pour qu'ils ne brûlent plus. Ils n'ont cependant rien perdu de leurs propriétés, car si on approche une bougie allumée un peu au-dessus de la toile, ils s'enflamment de nouveau. La toile n'a donc fait que refroidir les gaz en disséminant sur toute sa surface la chaleur dégagée dans la combustion.

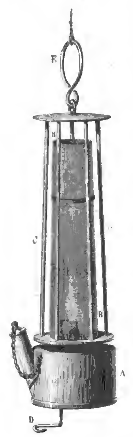


Fig. 141. — Lampe de sûreté de Davy.

Les toiles métalliques sont d'autant plus efficaces qu'elles sont à mailles plus serrées et d'un métal plus conducteur.

Davy a utilisé, vers 1815, cette importante propriété dans la construction de la *lampe de sûreté*, destinée à éclairer les mineurs, tout en prévenant l'explosion terrible du *feu grisou*.

282. **Lampe de sûreté**. — Elle se compose, comme le montre la figure 141, d'une lampe à huile A, dont la flamme est entourée d'une toile métallique B fixée sur le réservoir à huile par la cage C, qui la garantit de tout choc. Un fil de fer D recourbé traverse le réservoir et permet d'élever ou d'abaisser la mèche. Dès que le grisou se mêle à l'air, même en très-petite proportion, le mineur en est averti par l'augmentation du volume de la flamme. Quand le gaz forme le $\frac{1}{12}$ du volume de l'air, tout le cylindre se remplit d'une flamme bleu pâle. Cette flamme devient éclatante quand ce gaz forme le $\frac{1}{8}$ de l'air, enfin il y a explosion et la flamme s'éteint quand le gaz forme le $\frac{1}{3}$ de l'atmosphère.

Pour que le mineur ne soit pas alors dans l'obscurité complète, Davy a placé au-dessus de la mèche un fil de platine (*fig.* 142) enroulé en spirale, et qui reste incandescent par suite de sa propriété de déterminer la combustion des gaz inflammables au contact de l'air. Le mineur peut

alors se diriger de manière à fuir le danger. Dès qu'il arrive dans une atmosphère plus riche en oxygène, le platine rallume le gaz dans la toile métallique et celui-ci rallume à son tour la mèche sans qu'on ait eu besoin d'ouvrir la lampe.

La lampe de Davy avait l'inconvénient de donner peu de lumière, l'éclat se trouvant considérablement affaibli par la toile métallique qui entoure la flamme. M. Combes a corrigé ce défaut tout en conservant les avantages du modèle primitif :

La flamme est entourée d'un cylindre de cristal épais, surmonté d'une cheminée de cuivre destinée à activer le tirage, et garnie d'une toile métallique. Des ouvertures munies également de toiles métalliques permettent à l'air de pénétrer par la partie inférieure. Une spirale de platine est comme toujours suspendue dans la flamme.

Les explosions peuvent être évitées grâce à l'emploi de ces appareils, mais comme les mineurs commettent souvent l'imprudence d'enlever la partie supérieure de leur lampe, on compte encore un grand nombre d'accidents. L'aérage des mines constituera, toujours un des meilleurs moyens d'exploiter sans danger la plupart des houillères.



Fig. 142.

CHAPITRE X.

Classification des métalloïdes. — Propriétés spéciales de l'hydrogène.

DIVISION EN FAMILLES.

283. **Classification de M. Dumas.** — M. Dumas a divisé les métalloïdes en quatre groupes ou familles naturelles.

La première comprend le chlore, le brôme, l'iode et le fluor.

La seconde, l'oxygène, le soufre, le sélénium et le tellure.

La troisième, l'azote, le phosphore et l'arsenic.

La quatrième, le carbone, le bore et le silicium.

Cette classification, fondée sur la composition et les propriétés des composés que les métalloïdes forment avec l'hydrogène, rapproche de la manière la plus heureuse les corps qui présentent des analogies remarquables

Grâce à cette classification, il suffit de connaître un des corps de chaque groupe pour prévoir les réactions que présenteront les autres

corps de la même famille, quand ils seront placés dans les mêmes circonstances.

284. **Remarque.** — L'hydrogène seul reste en dehors des métalloïdes ainsi classés. L'hydrogène ressemble en effet beaucoup plus à un métal qu'à un métalloïde.

Nous avons déjà fait observer (43) que l'hydrogène est bon conducteur de la chaleur comme les métaux : si, dans un tube contenant un fil de platine maintenu au rouge par un courant électrique, on fait passer un gaz quelconque autre que l'hydrogène, le fil pourra rester rouge, mais il cessera d'être lumineux quand ce gaz sera de l'hydrogène, qui conduit mieux la chaleur.

L'hydrogène forme, en se combinant avec l'oxygène, un composé, l'eau, qui peut jouer le rôle de base vis-à-vis des acides énergiques. Aucun métalloïde ne jouit de cette propriété. C'est ainsi que nous avons vu l'eau entrer comme base dans les phosphates ordinaires, dans les pyrophosphates et dans les arséniates. Les acides hydratés, comme l'acide sulfurique, SO^3, HO, peuvent eux-mêmes être regardés comme des sels.

Le zinc, en décomposant SO^3, HO, et donnant

$$H + Zn\,O, SO^3,$$

agit exactement comme il le ferait sur $Cu\,O, SO^3$ en donnant

$$Cu + Zn\,O, SO^3.$$

M. Stas a fait voir que l'hydrogène, en passant sur du sulfate d'argent légèrement chauffé, le décompose et laisse de l'argent métallique, tandis que l'acide sulfurique monohydraté distille comme l'indique la formule suivante :

$$H + Ag\,O, SO^3 = Ag + H\,O, SO^3.$$

L'hydrogène comprimé décompose même le sulfate d'argent à froid.

L'eau joue quelquefois le rôle d'acide vis-à-vis des bases énergiques ; mais l'oxyde de zinc et beaucoup d'autres oxydes métalliques jouissent de la même propriété.

L'hydrogène se conduisant constamment comme un métal, il n'y a rien d'étrange à admettre l'existence d'un métal gazeux, l'hydrogène, à côté du métal liquide, le mercure.

PREMIÈRE FAMILLE.

CHLORE, BROME, IODE, FLUOR.

285. **Propriétés générales.** — Ces quatre corps sont caractérisés par leur grande affinité pour l'hydrogène : 2 volumes de ces corps, en s'unissant à 2 volumes d'hydrogène, donnent 4 volumes d'un hydracide

énergique, gazeux à la température ordinaire, fumant à l'air, très-soluble dans l'eau, et formant avec elle des hydrates définis.

Bien que le fluor n'ait pas encore été isolé, on le met dans cette famille, parce que les propriétés de l'acide fluorhydrique rappellent celles de l'acide chlorhydrique.

En agissant sur un même métal, ces corps forment des composés généralement isomorphes : tels sont, par exemple, les chlorure, bromure et iodure de potassium. La solubilité et la plupart des propriétés chimiques de ces composés présentent aussi une grande analogie : ainsi, les chlorure, bromure et iodure de plomb sont peu solubles, surtout à froid. Les chlorure, bromure et iodure d'argent sont insolubles dans l'eau, mais solubles dans l'ammoniaque et l'hyposulfite de soude ; ils sont altérables à la lumière.

Le chlore, le brôme et l'iode ont peu d'affinité pour l'oxygène ; ils ne se combinent jamais directement avec ce gaz ; et les composés qu'ils forment indirectement avec lui sont très-instables : on ne connaît pas de composé oxygéné du fluor ; les composés oxygénés du chlore sont au nombre de cinq et tous facilement décomposables ; le brôme a déjà un peu plus d'affinité pour l'oxygène ; ses oxacides sont moins nombreux, ils sont plus stables. Enfin l'iode a pour l'oxygène une affinité encore plus grande ; il ne donne que deux acides oxygénés, qui sont plus stables que les composés correspondants du chlore et du brôme.

L'affinité pour l'hydrogène suit l'ordre inverse ; ainsi le brôme décompose l'acide iodhydrique en s'emparant de son hydrogène ; le chlore décompose les acides bromhydrique et iodhydrique.

En ayant égard à l'ordre d'affinité décroissante pour l'hydrogène, on classe ces corps dans l'ordre suivant : fluor, chlore, brôme, iode.

Le tableau suivant nous montre que cet ordre est aussi celui que leur assigne l'ensemble de leurs propriétés physiques.

Ces corps ont tous une odeur pénétrante caractéristique ; ils irritent les organes de la respiration.

	FLUOR, Fl.	CHLORE, Cl.	BROME, Br.	IODE, Io.
État physique à la température ordinaire. . . .	Inconnu.	Gaz verdâtre.	Liquide rouge.	Solide gris de fer.
Densité à l'état solide ou liquide.	»	1,33	3	5
Densité de vapeur.. . . .	»	2,44	4,4	8,7
Point d'ébullition.. . . .	»	— 50°	63°	175°
Équivalent en poids.. . .	19	35,5	80	127
— en volume.. .	»	2 vol.	2 vol.	2 vol.

DEUXIÈME FAMILLE.

OXYGÈNE, SOUFRE, SÉLÉNIUM, TELLURE.

286. **Propriétés générales.** — Ces corps s'unissent à l'hydrogène pour former des corps faiblement acides.

1 volume de ces corps se combine avec 2 volumes d'hydrogène, et donne 2 volumes de vapeur du composé.

Nous avons signalé les analogies du soufre avec l'oxygène en montrant que le charbon et les métaux brûlent dans la vapeur de soufre comme dans l'oxygène, et qu'ils donnent de l'acide sulfocarbonique ou des sulfures qui présentent la plus grande analogie avec l'acide carbonique et les oxydes correspondants.

Les analogies du soufre, du sélénium et du tellure entr'eux sont encore plus évidentes : les acides sulfhydrique, sélénhydrique, tellurhydrique sont des acides faibles, assez peu solubles dans l'eau et doués d'une odeur désagréable d'œufs ou de choux pourris. Les séléniures et les tellurures sont isomorphes avec les sulfures; on les rencontre constamment réunis dans la nature.

Le soufre, le sélénium et le tellure forment, en brûlant dans l'oxygène ou dans l'air, des acides sulfureux, sélénieux, tellureux, formés de 1 volume de vapeur du corps avec 2 volumes d'oxygène, condensés en 2 volumes du composé. — Ces acides se transforment, en présence des corps oxydants, en acides sulfurique, sélénique, tellurique, qui forment avec les bases des sels isomorphes.

Le tableau suivant nous montre que l'ordre dans lequel nous les avons rangés est justifié par l'ensemble de leurs propriétés.

On y voit que l'équivalent augmente avec la fixité du corps et avec sa tendance à prendre l'aspect métallique.

Ces remarques s'appliquent d'ailleurs aux autres familles.

	OXYGÈNE, O.	SOUFRE, S.	SÉLÉNIUM, Se.	TELLURE, Te.
État.	Gaz incolore.	Solide jaune.	Solide brun rouge.	Solide gris métall.
Densité à l'état solide. . .	»	2,03	4,8	6,26
Densité à l'état gazeux. .	1,1056	2,22	5,6	8,93
Point de fusion.	»	111°	217°	350°
Point d'ébullition.	»	440°	700°	Rouge.
Équivalent en poids. . .	8	16	39,75	64,5
Équivalent en volume. . .	1 vol.	1 vol.	1 vol.	1 vol.

TROISIÈME FAMILLE.

AZOTE, PHOSPHORE, ARSENIC.

287. **Propriétés générales.** — Ces corps ont pour caractère essentiel la propriété de former avec l'hydrogène des composés gazeux, qui sont des bases ou des corps neutres. Parmi ces composés, l'ammoniaque AzH^3 est formé de 6 volumes d'hydrogène et 2 volumes d'azote, condensés en 4 volumes; les phosphure et arséniure d'hydrogène PhH^3 et AsH^3 sont formés de 6 volumes d'hydrogène et de 1 volume de vapeur de phosphore ou d'arsenic, condensés également en 4 volumes.

L'ammoniaque est une base énergique, le phosphure d'hydrogène est une base faible, jouant le même rôle que l'ammoniaque vis-à-vis de l'acide iodhydrique; enfin l'arséniure d'hydrogène est un corps neutre. L'analogie de ces trois composés est surtout mise en évidence par les phénomenes de substitution qu'ils présentent en chimie organique.

L'azote, le phosphore et l'arsenic forment avec l'oxygène des acides énergiques, qui neutralisent parfaitement les alcalis. L'analogie du phosphore et de l'arsenic se traduit par l'isomorphisme des phosphates et arséniates, que l'on trouve constamment associés dans la nature.

L'azote se distingue des deux autres corps du même groupe par plusieurs propriétés : ainsi sa densité correspond à 2 volumes, tandis que celle du phosphore et de l'arsenic correspond à un volume. On est ainsi conduit à admettre avec M. Deville que l'azote double de volume en sortant de ses combinaisons. Cette hypothèse rendrait compte des propriétés explosives d'un grand nombre de composés azotés; elle expliquerait aussi la difficulté que présente l'azote à se combiner directement, soit avec l'oxygène, soit avec l'hydrogène ou les autres corps simples.

Le tableau suivant nous montrera que, pour cette famille comme pour les précédentes, la densité, les points de fusion et d'ébullition s'élèvent en même temps que l'équivalent.

	AZOTE, Az.	PHOSPHORE, Ph.	ARSENIC, As.
État.	Gaz incolore	Solide incolore	Solide gris métallique
Densité à l'état solide. . .	»	1,84	5,63
Densité à l'état gazeux. .	0,9713	4,32	10,3
Point de fusion.	»	44°,2	rouge sombre.
Point d'ébullition.	»	290°	rouge sombre.
Équivalent en poids. . .	14	31	75
Équivalent en volume. . .	2 vol.	1 vol.	1 vol.

QUATRIÈME FAMILLE.

CARBONE, BORE, SILICIUM.

288. **Propriétés générales**. — Ces trois corps sont solides, infusibles et fixes à toutes les températures de nos fourneaux. Tous trois présentent les mêmes modifications moléculaires, aussi les connaît-on tous les trois à l'état amorphe, à l'état graphitoïde et à l'état cristallin (système cubique). Facilement attaqués par les réactifs quand ils sont amorphes, ils deviennent presque inattaquables à l'état cristallin.

Le diamant est le plus dur de ces trois corps ; le bore adamantin vient ensuite, et enfin le silicium cristallisé. Ce dernier est fusible, les deux autres n'ont pu encore être fondus; cependant, Despretz a ramolli et volatilisé un peu de charbon sous l'influence d'une pile de 600 éléments.

Ces trois corps ne sont solubles que dans les métaux en fusion : le carbone est soluble dans la fonte de fer, le bore dans l'aluminium, le silicium dans l'aluminium et dans le zinc.

Les propriétés chimiques n'établissent pas, entre ces trois corps, autant d'analogie que leurs propriétés physiques : ils donnent des composés stables avec l'azote. L'hydrogène forme avec le carbone un grand nombre de composés peu stables en général, parmi lesquels nous avons étudié le protocarbure et le bicarbure d'hydrogène. Il y en a un grand nombre d'autres étudiés en chimie organique. On ne connaît qu'un composé de silicium et d'hydrogène; on n'a pas encore découvert de composé hydrogéné du bore.

Les composés oxygénés du carbone n'offrent pas d'analogie bien saillante avec ceux du bore et du silicium.

Ces deux derniers éléments se ressemblent davantage; leurs acides oxygénés, acides borique et silicique, sont fixes, fusibles à haute température et *vitrifiables*.

Le chlore, le fluor, le soufre forment avec le bore et le silicium des composés très-analogues.

	CARBONE C.	BORE, Bo.	SILICIUM. Si.
État.	Cristallin, graphitoïde amorphe.	Cristallin, graphitoïde amorphe.	Cristallin, graphitoïde amorphe.
Densité à l'état cristallin.	3,55	2,68	2,49
Équivalent.	6	11	21

MÉTAUX

CHAPITRE PREMIER.

Généralités sur les métaux et les alliages.

PROPRIÉTÉS DES MÉTAUX.

289. **Définition.** — Les métaux sont des corps simples qui se distinguent des métalloïdes, au point de vue chimique, par la propriété qu'ils possèdent de former, en se combinant avec l'oxygène, un ou plusieurs composés basiques. Au point de vue physique, ils s'en distinguent par un éclat particulier appelé *éclat métallique;* ils sont bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité. Réduits en poudre, les métaux perdent leur éclat et leur conductibilité; mais ils reprennent ces propriétés dès qu'ils deviennent plus compactes.

290. **Propriétés physiques.** — Les propriétés physiques des métaux ont une grande importance au point de vue de leurs applications industrielles.

Les métaux sont solides, à l'exception du mercure, qui est liquide aux températures ordinaires.

Tous sont opaques quand on les prend sous une épaisseur suffisante. Réduits en lames minces, ils deviennent transparents; c'est ce que l'on constate à l'aide d'une feuille d'or collée sur une lame de verre. La lumière qui traverse présente la couleur verte, complémentaire de la couleur réfléchie.

Couleur. — La plupart des métaux sont d'un blanc plus ou moins pur. L'argent est blanc jaunâtre, le zinc blanc bleuâtre, le fer est d'un blanc gris. Il y a cependant quelques métaux colorés, comme l'or, le cuivre. — Les couleurs que nous leur connaissons se modifient profondément quand on force les rayons lumineux à se réfléchir plusieurs fois sur le même métal. C'est ce qu'a fait Bénédict Prevost. On trouve alors que l'argent est jaune pur, le zinc bleu indigo, le fer violet, le cuivre rouge écarlate, l'or rouge vif.

On s'explique ces résultats en remarquant que la lumière, en tombant sur les corps, est en partie absorbée, en partie réfléchie régulièrement et en partie diffusée : or ce qu'on doit nommer en général *couleur* d'un

corps est la couleur constituée par la lumière diffusée. — Après une seule réflexion, la quantité de lumière réfléchie régulièrement et non décomposée prédomine sur la lumière diffusée, et par suite lave cette lumière dans une telle quantité de blanc, qu'elle la rend difficilement perceptible. Par des réflexions successives, cette lumière blanche se décompose à son tour et la quantité de lumière diffusée augmentant sans cesse, la couleur apparaît de plus en plus pure.

Densité. — Tous les métaux, à l'exception des métaux alcalins, sont plus lourds que l'eau. Pour beaucoup d'entre eux, la densité augmente un peu avec l'écrouissage; ainsi le platine fondu, qui a pour densité 21,15, peut, par un martelage prolongé, acquérir une densité égale à 23.

Platine laminé	22,07	Nickel	8,60
Or laminé	19,35	Fer en barre	7,78
Mercure solide	14,40	Étain	7,29
Mercure liquide	13,59	Zinc	6,86
Plomb fondu	11,35	Aluminium	2,56
Argent fondu	10,4	Sodium	0,97
Cuivre fondu	8,78	Potassium	0,86
Cadmium	8,60	Lithium	0,59

Température de fusion. — La plupart des métaux fondent aux températures de nos fourneaux. Quelques-uns, comme le platine, exigent la chaleur du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène.

Mercure	—39°	Zinc	410°
Rubidium	38,5	Aluminium	Au rouge.
Potassium	62,5	Argent	1000 (rouge vif.)
Sodium	96,0	Cuivre	1100
Lithium	180,0	Or	1250
Étain	228	Fonte	1250
Plomb	335	Fer forgé	1500
Cadmium	360	Platine	2000

Température d'ébullition. — Tous les métaux, même le platine (H. Sainte-Claire Deville) ont pu être volatilisés. La volatilité de l'argent a été depuis longtemps constatée dans la fusion de ce métal pour la fabrication des monnaies. L'or, le cuivre, le plomb se vaporisent aussi sensiblement dès qu'on les chauffe au-dessus de leur point de fusion. Cette volatilité des métaux est utilisée en métallurgie pour l'extraction du zinc, du mercure, du potassium et du sodium.

Le mercure bout à 360°, le cadmium à 860°. Le potassium et le sodium se vaporisent au rouge; le zinc et le magnésium, à environ 1000°.

Cristallisation. — Les métaux cristallisent en général dans le

système cubique; cependant le bismuth et l'antimoine donnent des rhomboèdres.

Un certain nombre de métaux se trouvent cristallisés dans la nature; tels sont l'or, l'argent, le cuivre natifs.—La cristallisation artificielle peut s'obtenir par fusion et décantation; c'est ainsi qu'on opère pour le bismuth et l'antimoine. — On peut encore faire cristalliser un métal en le séparant lentement de sa dissolution par un courant faible. Ainsi, en plongeant les deux pôles d'un couple dans une dissolution de sulfate de cuivre, on voit au bout de quelque temps apparaître au pôle négatif de petits cristaux de cuivre. On obtient une belle cristallisation de plomb en suspendant par un fil de cuivre une lame de zinc dans une dissolution très-étendue d'acétate de plomb. Le métal se présente alors sous forme de lamelles brillantes, rappelant l'aspect des feuilles de fougère; c'est l'*arbre de Saturne*.

Malléabilité. — On dit qu'un métal est malléable quand il peut se réduire en feuilles minces sous l'action du marteau ou du laminoir. Sous le rapport de la malléabilité, les métaux peuvent être rangés dans l'ordre suivant ;

Or.	Cuivre.	Plomb.
Argent.	Étain.	Zinc
Aluminium.	Platine.	Fer.

Ductilité. — Les métaux sont d'autant plus ductiles qu'ils se laissent étirer en fils plus fins. L'or est le métal le plus ductile comme le plus malléable. L'ordre de ductilité n'est cependant pas toujours le même que l'ordre de malléabilité, ainsi qu'on le verra par le tableau suivant :

Or.	Aluminium.	Zinc.
Argent.	Fer.	Étain
Platine.	Cuivre.	Plomb.

Si le plomb est peu ductile, quoique très-malléable, cela tient à ce que, ayant peu de ténacité, il se brise quand on le tire pour le faire passer à travers les trous de plus en plus fins d'une plaque d'acier appelée *filière*.

Ténacité. — Les métaux sont d'autant plus tenaces qu'il faut un plus grand nombre de kilogrammes pour rompre des fils de même section (1 millimètre, par exemple). Le fer est le plus tenace des métaux usuels; viennent ensuite, par ordre, le cuivre, le platine, l'argent, l'or, le zinc, l'étain et le plomb.

291. **Propriétés chimiques des métaux**. — Les propriétés chimiques des métaux, la manière dont ils se comportent au contact de l'air, de l'eau et des autres corps simples ou composés, seront l'objet d'un examen approfondi (297 et suivants).

CLASSIFICATION DES MÉTAUX.

292. **Classification pratique**. — On a vainement essayé jusqu'ici de trouver pour les métaux une classification naturelle, analogue à celle que M. Dumas a établie pour les métalloïdes. Le problème ne pourra être abordé avec chance de succès que le jour où l'on connaîtra parfaitement les propriétés des métaux appelés *rares*, et qui sont en général intermédiaires entre les métaux communs.

Thenard a donné une classification artificielle d'une grande importance pratique. Elle est fondée sur l'affinité des métaux pour l'oxygène, et cette affinité est appréciée :

1° par l'action directe de l'air sec ou de l'oxygène.

2° Par l'action de la chaleur sur les oxydes métalliques ;

3° Par l'action décomposante des métaux sur l'eau aux différentes températures ou en présence des acides.

Nous conserverons la division des métaux en six sections, en indiquant les changements que l'expérience tend à introduire dans cette classification déjà modifiée par M. Regnault.

1re section. — Les métaux de la première section se combinent avec l'oxygène, soit à la température ordinaire s'il est humide, soit aux températures élevées s'il est sec. (Le potassium paraît seul se combiner à l'oxygène sec et froid.) Ils décomposent l'eau à froid. Leurs oxydes sont irréductibles par la chaleur. Ce sont :

Thallium.	Potassium.	Baryum.
Cæsium.	Sodium.	Strontium.
Rubidium.	Lithium.	Calcium.

Les six premiers métaux de cette section sont appelés métaux *alcalins*, les trois derniers sont des *alcalino-terreux*.

2e section. — Métaux qui se combinent avec l'oxygène aux températures élevées. Ils décomposent l'eau au-dessus de 50°. Leurs oxydes ne peuvent pas être complétement réduits par la chaleur.

Magnésium.	Manganèse.

A ces deux métaux Thenard en a joint un grand nombre d'autres appelés métaux terreux, mais dont les propriétés étaient à peu près inconnues ; ce sont :

Aluminium	Yttrium.
Lanthane.	Glucinium.
Thorium.	Didyme.
Zirconium.	Cerium.
Erbium.	Terbium.

Deux de ces métaux, l'aluminium et le glucinium ont été étudiés d'une manière complète; ils ne s'oxydent à aucune température, ils paraissent intermédiaires entre les métaux communs et les métaux nobles. Une connaissance plus approfondie des corps que nous plaçons à leur suite viendra peut-être révéler des propriétés qui les éloigneront également de cette section. L'impossibilité de les classer actuellement nous les fait seule laisser à la place que Thenard leur a assignée.

3e section. — Métaux se combinant avec l'oxygène aux températures élevées. Leurs oxydes sont irréductibles par la chaleur. Ils décomposent l'eau à la température du rouge sombre ou à la température ordinaire en présence des acides énergiques.

Fer.	Chrome.
Vanadium.	Nickel.
Zinc.	Uranium.
Cobalt.	Cadmium.

4e section. — Métaux décomposant l'eau au rouge. Ils ne la décomposent pas à froid en présence des acides, mais ils l'attaquent à 100° en présence de la potasse, grâce à leur tendance à former avec l'oxygène des composés acides. Ces métaux s'oxydent aux températures élevées; leurs oxydes sont irréductibles par la chaleur.

Tungstène.	Tantane.	Antimoine.
Molybdène.	Titane.	Niobium.
Osmium.	Étain.	Ilménium.

5e section. — Métaux décomposant l'eau au rouge vif. Ils ne la décomposent aux températures ordinaires ni en présence des acides, ni en présence des bases. Ils se combinent encore avec l'oxygène aux températures élevées. Leurs oxydes sont irréductibles par la chaleur seule.

Cuivre.	Plomb.	Bismuth.

6e section. — Métaux ne décomposant l'eau à aucune température pour s'emparer de son oxygène. Leurs oxydes sont tous réductibles par la chaleur :

Mercure.	Argent.
Palladium.	Platine.
Rhodium.	Or.
Ruthénium.	Iridium.

Les quatre premiers s'oxydent aux températures peu élevées, mais leurs oxydes se réduisent très-facilement. Les quatre derniers ne s'oxydent à aucune température.

ALLIAGES.

293. **Utilité des alliages.** — Un très-petit nombre de métaux satisfont aux conditions spéciales exigées par l'industrie. Le fer, le zinc, l'étain, le cuivre, le plomb, le mercure, l'aluminium et le platine sont à peu près les seuls métaux qu'on emploie purs; les autres ne s'utilisent qu'à l'état d'alliages. Ceux mêmes que nous venons de citer forment encore des alliages très-importants.

Certains métaux sont trop mous, ils s'useraient très-rapidement; d'autres sont trop cassants, ils se briseraient sous la pression. En mêlant convenablement deux métaux, on peut obtenir des alliages qui jouissent de propriétés étrangères aux métaux qui les constituent. — Nous pouvons prendre pour exemple l'alliage des caractères d'imprimerie. Cet alliage doit être assez fusible pour que les caractères puissent se fabriquer par moulage; il doit bien prendre l'empreinte du moule pour donner des caractères nets; enfin il doit être dur et non cassant pour résister à l'action de la presse sans s'écraser ou se briser. Aucun métal ne réalise toutes ces conditions à la fois : le fer, le cuivre ne sont pas assez fusibles, il en est de même de l'or, de l'argent, du platine dont le prix est d'ailleurs trop élevé; le zinc, l'antimoine et le bismuth sont trop cassants; le plomb et l'étain sont trop mous. En mêlant 4 parties de plomb avec 1 partie d'antimoine, on aura un alliage qui jouira de toutes les propriétés demandées; il sera très-fusible, très-dur et très-résistant.

Pour fabriquer les monnaies, on ne peut employer ni l'or ni l'argent à l'état de pureté, ils sont trop mous et par suite s'useraient trop vite. On leur donne de la dureté en y mêlant un dixième de cuivre.

Les alliages sont pour ainsi dire de nouveaux métaux qui ont une grande importance pour l'industrie.

294. **Constitution des alliages.** — On a cru pendant longtemps que les alliages n'étaient que de simples mélanges de métaux; on se fondait sur ce que certains corps, comme l'or et l'argent, paraissent se dissoudre en toute proportion dans le mercure, de même que le plomb et le bismuth disparaissent dans l'étain en fusion. Mais un examen plus approfondi n'a pas tardé à faire reconnaître que les alliages sont de véritables combinaisons en proportions définies, souvent dissoutes dans un excès de l'un des métaux qui y entrent.

Les phénomènes de chaleur et de lumière qui accompagnent les combinaisons peuvent être mis en évidence dans la production de certains alliages. Ainsi le potassium, en s'unissant au mercure, produit le bruit d'un fer rouge plongé dans l'eau, et la température s'élève considéra-

blement. L'antimoine et le potassium chauffés dans une cloche courbe, au milieu d'une atmosphère d'azote, se combinent avec chaleur et lumière.

Si le dégagement de chaleur n'est pas toujours sensible, cela tient à deux causes : 1° à ce que le métal bon conducteur dispersant cette chaleur en tous sens, empêche l'élévation de température au point où se fait la combinaison; ce métal agit ici comme les toiles métalliques dans les flammes; 2° à ce que, au moment de la combinaison, l'un des métaux passant de l'état solide à l'état liquide absorbe en fondant une certaine quantité de chaleur qui devient latente. — On peut même concevoir que si la chaleur latente est plus forte que la chaleur de combinaison, il y aura abaissement de température. C'est ce qui arrive pour l'argent, qui, en se dissolvant dans le mercure, produit du froid. Le plomb, l'antimoine ou le bismuth, en s'alliant au mercure, peuvent abaisser la température à — 16°.

Les métaux forment en s'unissant ainsi des alliages en proportions définies que l'on peut isoler et qui se présentent avec des formes cristallines souvent assez nettes. — Ainsi l'or paraît se dissoudre en toute proportion dans le mercure, mais si on met l'alliage liquide dans une peau de chamois, et que par pression on force l'excès de mercure à filtrer, il reste dans le nouet un alliage cristallisé contenant 1 équivalent de mercure pour 2 équivalents d'or. On utilise cette propriété dans la métallurgie de l'or.

On trouve encore une preuve de l'existence de ces combinaisons définies dans le phénomène de la *liquation*.

295. **Liquation.** — Si on laisse refroidir très-lentement un alliage fondu, on peut souvent constater à l'aide d'un thermomètre que la température, après s'être abaissée d'une manière continue, reste quelque temps stationnaire; au même moment, une partie du liquide se solidifie et donne un alliage bien défini. Si on enlève ce premier alliage, quand la température recommence à s'abaisser, on pourra, au bout de quelque temps, constater sur le thermomètre un nouvel arrêt correspondant à la solidification d'un nouvel alliage. L'alliage fondu et en apparence homogène se sépare donc à une température voisine de sa fusion en plusieurs alliages en proportions définies qui existaient à l'état de mélange dans un excès de l'un des métaux; ce phénomène constitue la *liquation*. Ce même phénomène se produit également quand on chauffe un peu au-dessous de son point de fusion un alliage en apparence homogène qui, après avoir été fondu, a subi un refroidissement brusque. L'alliage défini le plus fusible coule le premier, puis, si on continue à chauffer, on obtient un nouvel alliage, et il reste à la fin une espèce d'éponge formée par le corps le moins fusible. C'est ce qui s'est produit d'une manière inattendue lorsqu'on a voulu employer les plaques de sûreté pour les soupapes des chaudières à vapeur. En se basant sur ce qu'en faisant

varier la proportion de l'un des métaux dans certains alliages, on peut modifier sa température de fusion, on avait imaginé de mettre sous les soupapes des chaudières à vapeur des plaques qui devaient fondre quand la vapeur aurait atteint une force élastique déterminée. Mais on reconnut bientôt qu'avant d'arriver à cette température l'alliage s'était subdivisé en plusieurs autres dont les plus fusibles, en s'écoulant, pouvaient déterminer des fuites, et dont les derniers ne fondaient qu'à une température supérieure à celle qu'on se proposait de ne pas dépasser.

296. **Propriétés physiques.** — Les alliages sont opaques, doués de l'éclat métallique, bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité. La plupart sont blancs, mais ils sont colorés quand ils contiennent une assez grande quantité d'un métal rouge, comme le cuivre, ou jaune, comme l'or.

Densité. — La densité d'un alliage est d'ordinaire différente de la moyenne des densités des métaux qui y entrent. En général, la combinaison de deux métaux qui ont une grande affinité, donne naissance à des alliages dont la densité est plus grande que la demi-somme des densités des éléments; il y a donc eu contraction. C'est ce qui se produit dans la combinaison de l'or et de l'étain, du cuivre et du zinc. Il y a, au contraire, dilatation quand les métaux qui se combinent n'ont que peu d'affinité, comme dans les alliages d'or et d'argent.

Dureté, ténacité, ductilité, malléabilité. — Les alliages sont, en général, plus durs, mais moins tenaces, moins ductiles et moins malléables que les métaux dont ils sont formés : ainsi l'or, le plus ductile et le plus malléable des métaux, devient dur et cassant (*aigre*) quand on l'allie à l'antimoine ou au plomb. Le cuivre perd également sa ductilité en s'unissant à l'étain.

Trempe. — Les alliages de cuivre et d'étain présentent la propriété remarquable de perdre leur dureté par la trempe. Ce fait curieux a été découvert par Darcet dans les circonstances suivantes : L'examen le plus superficiel montre que les tam-tams chinois ont été martelés; or, chaque fois qu'on essaye de battre un alliage ayant la même composition on le voit se briser. Darcet eût l'idée de le tremper et reconnut qu'il devient immédiatement malléable. Depuis cette époque, on fabrique en France des tam-tams aussi bons que ceux des Chinois.

Fusibilité. — Les alliages sont toujours plus fusibles que le moins fusible des métaux qui entrent dans leur composition. Quelques-uns même fondent souvent à une température plus basse que le plus fusible de ces métaux. — Ainsi, tandis que le plomb ne fond qu'à 335°, le bismuth à 264° et l'étain à 228, l'alliage de 8 de bismuth, 5 de plomb, 3 d'étain fond à 94°,5.

297. **Propriétés chimiques.** — La chaleur décompose les alliages qui contiennent un métal volatil. Cette propriété est utilisée dans la métallurgie de l'or et dans celle de l'argent : le métal pulvérulent s'incorpore d'abord au mercure; on extrait l'excès de mercure par filtration à travers une peau de chamois, et en chauffant ensuite l'alliage, on en chasse le reste du métal volatil.

L'oxygène aura, en général, d'autant plus d'action sur un alliage que l'un des métaux sera plus électro-négatif par rapport à l'autre. C'est ainsi que les alliages d'étain et de plomb, d'antimoine et de potassium légèrement chauffés brûlent avec incandescence.

298. **Préparation.**—On fond, en général, les métaux divisés en fragments dans un creuset de terre, en ayant soin de les recouvrir de poussière de charbon, de manière à éviter toute oxydation. Si l'un des métaux est volatil, on ne l'ajoute qu'au moment où l'autre métal est déjà en fusion, on en met d'ailleurs un petit excès pour prévenir la perte qui sera due à la volatilisation. — En coulant ensuite rapidement, on pourra obtenir un alliage homogéne s'il est en petite quantité — Si la masse était considérable, on ne pourrait pas éviter la liquation; c'est ce qui arrive dans la coulée des canons : on est obligé de donner au moule une hauteur beaucoup plus grande que celle du canon, parce que la partie supérieure sera plus riche en étain que la partie inférieure. Cette partie supérieure constitue la masselotte et doit être enlevée.

299. **Principaux alliages usuels.** — Le cuivre est un des métaux qui entrent dans le plus d'alliages. — En combinaison avec les métaux précieux, il leur donne de la dureté, et partant, leur permet de conserver toute la finesse des empreintes sans altérer leur couleur et leur éclat.

Avec l'aluminium, il donne un bronze très-dur et très-malléable.

Le cuivre forme avec l'étain des bronzes trés-intéressants et qui montrent bien l'influence de la proportion de l'un des métaux sur les propriétés de l'alliage. Ainsi, le bronze des canons est remarquable par sa ténacité; le bronze des cloches et des tam-tams, qui ne diffère du premier que par une plus grande proportion d'étain est cassant, mais il a une sonorité trés-grande, que ne possède heureusement pas le bronze des canons. En augmentant encore la proportion d'étain on obtient un alliage très-blanc et susceptible d'acquérir par le poli un éclat qui le fait rechercher pour les miroirs de télescope.

L'alliage de cuivre et de zinc appelé *laiton* est trop connu pour qu'on ait besoin d'insister sur son importance.

Le cuivre entre encore dans la composition du *maillechort*, alliage blanc quand il a été récemment préparé, jaunissant peu à peu, et qui est surtout employé après avoir été recouvert d'une couche d'or ou d'argent par la galvanoplastie.

Le plomb est, après le cuivre, celui de tous les métaux qui entre dans le plus grand nombre d'alliages.

Monnaies d'or	or	900
	cuivre	100
Vaisselle et médailles	or	916
	cuivre	84
Bijouterie d'or	or	750
	cuivre	250
Monnaies d'argent	argent	900
	cuivre	100
Vaisselle et médailles	argent	950
	cuivre	50
Bijouterie	argent	800
	cuivre	200
Le bronze des monnaies ordinaires et des médailles est formé de	cuivre	95
	étain	4
	zinc	1
Bronze d'aluminium	aluminium	5 à 10
	cuivre	95 à 90
Bronze des canons	cuivre	90
	étain	10
Bronze des tam-tams et des cymbales	cuivre	80
	étain	20
Bronzes des miroirs de télescopes	cuivre	67
	étain	33
Laiton	cuivre	67
	zinc	33
Le *maillechort* est formé de	Cuivre	50
	Zinc	25
	Nickel	25
Enfin le métal anglais contient	Étain	100
	Antimoine	8
	Bismuth	1
	Cuivre	4
Caractères d'imprimerie	plomb	80
	antimoine	20
Mesures d'étain (litre, décilitre, etc.)	plomb	18
	étain	82

CHAPITRE II.

Action de l'oxygène, du soufre, du chlore, sur les métaux
Oxides, sulfures, chlorures.

—

ACTION DE L'OXYGÈNE ET DE L'AIR.

300. **Action de l'oxygène et de l'air secs.** — L'action de l'air ne diffère de celle de l'oxygène que par son intensité, qui est moindre.

A la température ordinaire, le potassium est le seul corps qui puisse s'emparer de l'oxygéne sec. Tous les autres métaux, à l'exception de l'argent, de l'or et du platine, s'oxydent au contact de l'oxygène ou de l'air secs, à une température plus ou moins élevée. Cette combinaison est souvent accompagnée d'un dégagement de chaleur et de lumière ; elle s'effectue d'ailleurs à une température d'autant moins élevée que le métal est plus divisé : ainsi, le fer en lames a besoin d'être porté au rouge par quelques-uns de ses points pour brûler dans l'oxygène, le fer pulvérulent provenant de la réduction de son oxyde par l'hydrogène, devient incandescent dès qu'on le projette dans l'oxygène.

La combustion d'un métal sera complète quand il pourra avoir constamment le contact de l'air. C'est ce qui arrive pour la spirale de fer dans l'oxygène, parce que l'oxyde fusible se détache peu à peu et laisse à nu le fer porté au rouge. — L'antimoine, qui est fixe, devra sa combustion complète à la volatilité de son oxyde. Si on verse dans l'air, d'une assez grande hauteur, de l'antimoine fortement chauffé, le métal, en tombant sur une table, rejaillit en un très-grand nombre de gouttelettes incandescentes. — Le zinc, porté à une assez haute température, brûlera, grâce à sa volatilité ; sa vapeur donnera une flamme dont l'éclat sera dû à la présence de l'oxyde de zinc incandescent.

301. **Action de l'oxygène et de l'air humides.** — A la température ordinaire, l'oxygène humide n'agit que sur les métaux qui décomposent l'eau à froid, c'est-à-dire sur les métaux alcalins ou alcalino-terreux. Mais si l'on fait intervenir un acide, même très-faible, ou très-dilué, la plupart des métaux s'altèrent, grâce à l'affinité de l'acide, pour la base qui tend à se former. L'air humide contenant de l'acide carbonique, se conduira comme l'oxygène humide en présence des acides.

Les métaux de la dernière section résistent seuls.

Dans beaucoup de cas, l'action n'est que superficielle, la couche oxydée protégeant le reste du métal contre l'action de l'oxygène. C'est ce qui

arrive pour le *zinc*, le *cuivre* et le *plomb*, qui se recouvrent d'une couche d'hydrocarbonate imperméable.

Quelquefois, au contraire, l'altération est profonde, comme pour le *fer*, qui, exposé à l'air humide, se transforme complétement en rouille. Dans ce cas, l'oxydation résulte de ce que l'oxygène et l'acide carbonique dissous dans l'eau tendent à former un carbonate de protoxyde de fer qui, au contact de l'air, se transforme en sesquioxyde de fer hydraté. Cette altération du fer ne se produit, dans les premiers moments, qu'avec une extrême lenteur; mais, une fois la première tache de rouille formée, l'oxydation marche rapidement, parce que l'oxyde poreux forme avec le fer une pile où le fer est l'élément électropositif Ce couple décompose l'eau dont l'oxygène s'unit au métal. Quant à l'hydrogène, il s'en dégage une partie, tandis que l'autre se combine à l'azote dissous dans l'eau pour former de l'ammoniaque. Ce dernier composé existe en effet dans presque toutes les taches de rouille.

L'air agit donc ici à la fois par son oxygène, par sa vapeur d'eau et par son acide carbonique. Ces trois influences sont d'ailleurs nécessaires. Si on élimine, par exemple, l'acide carbonique, rien ne se produit, comme il est facile de le constater; car le fer se conserve intact dans une dissolution alcaline même aérée.

302. **Moyens de prévenir l'oxydation.** — On a préservé le fer de l'oxydation en le recouvrant d'un métal moins oxydable, l'*étain* (fer étamé), ou le *zinc* (fer galvanisé). Le choix du métal protecteur n'est pas indifférent. Ainsi, l'étain protége bien le fer, tant que ce dernier métal n'est mis à nu par aucun de ses points; mais, dès qu'il a le contact de l'air, il s'altère rapidement, parce qu'il forme avec l'étain une pile dans laquelle il est l'élément électropositif, de sorte que, l'étain, au lieu de protéger le fer, devient une cause d'altération profonde. Le zinc, qui est électropositif par rapport au fer, conduit à de bien meilleurs résultats : si le fer est mis à nu par quelque point, il tend encore à se former une pile, mais le fer électronégatif restera intact. Quant au zinc, comme il donne naissance, en s'altérant, à une couche d'hydrocarbonate de zinc imperméable, son oxydation s'arrêtera promptement.

C'est également pour préserver de l'oxydation les métaux constamment exposés à l'air, qu'on recouvre de plusieurs couches de vernis ou de peinture les grilles des jardins et les ferrures de toute espèce.

OXYDES MÉTALLIQUES.

303. **Propriétés physiques.** — Les oxydes métalliques sont des corps solides cassants, souvent même friables. Ils sont inodores, dénués d'éclat métallique et conduisent mal la chaleur et l'électricité.

Leur densité est plus grande que celle de l'eau, mais elle est inférieure à celle du métal correspondant, sauf pour les métaux alcalins.

Couleur. — Les oxydes sont diversement colorés. Un même oxyde peut avoir des couleurs qui varient avec son état moléculaire : l'oxyde de mercure, obtenu par voie humide, est jaune; obtenu par voie sèche (calcination de l'azotate), il est rouge orangé. Ce même oxyde, chauffé vers 400°, devient brun foncé; il reprend sa couleur rouge en revenant à la température ordinaire.

Fusibilité. — Beaucoup d'oxydes fondent à la température de nos fourneaux; cependant, l'alumine et la baryte exigent la température du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène. La chaux et la magnésie résistent même à la chaleur dégagée par le chalumeau. Quelques oxydes sont volatils, comme l'oxyde d'antimoine, l'acide osmique.

Solubilité. — Les oxydes des métaux des cinq dernières sections sont insolubles dans l'eau, à l'exception des oxydes de plomb, d'argent et de magnésie, qui communiquent une réaction alcaline à l'eau, dans laquelle ils se dissolvent en petite quantité.

Les oxydes des métaux alcalins sont très-solubles.

304. **Propriétés chimiques.** — Les oxydes peuvent exister anhydres ou en combinaison avec l'eau à l'état d'hydrates. Quelques hydrates sont indécomposables par la chaleur, comme la potasse et la soude; les autres se réduisent facilement; l'hydrate d'oxyde de cuivre se réduit au milieu de l'eau quand on porte celle-ci à l'ébullition. C'est ce que l'on reconnaît facilement car l'hydrate bleu devient noir en passant à l'état d'oxyde anhydre.

La chaleur réduit à l'état métallique les oxydes des métaux de la sixième section. Tous les autres, ou sont complétement indécomposables, ou peuvent seulement être ramenés à un degré moindre d'oxydation. L'oxyde auquel on arrive alors par décomposition est précisément celui auquel on serait arrivé par oxydation directe du métal à la même température. *Ex.:* Le bioxyde de manganèse donne l'oxyde salin,

$$3MnO^2 = Mn^3O^4 + 2O.$$

C'est la réaction que nous avons utilisée pour la préparation de l'oxygène.

L'*électricité* de la pile décompose tous les oyxdes, à l'exception de l'alumine et des autres oxydes appelés terreux.

305. **Action de l'oxygène.** — A la température ordinaire, l'oxygène n'agit guère que sur les oxydes hydratés : si, par exemple, on traite par un alcali un sel de protoxyde de fer, il se forme d'abord un précipité blanc d'hydrate de protoxyde de fer qui, s'altérant rapidement au contact de l'air, devient vert, brun, puis enfin jaune de rouille.

A une température peu élevée, l'oxygène fait passer certains oxydes à

un degré supérieur d'oxydation : ainsi, la baryte (BaO), chauffée au rouge sombre, au contact de l'oxygène, se transforme en bioxyde de baryum (BaO^2). Le protoxyde de plomb (PbO) se change, dans les mêmes conditions, en minium (Pb^3O^4).

A une température très-élevée, la suroxydation ne se produit que lorsqu'elle peut conduire à celui des oxydes qui est le plus stable. La baryte et la litharge ne s'oxydent pas dans ces conditions, parce que ces oxydes sont plus stables que les oxydes supérieurs. Mais le protoxyde d'étain gris brun (SnO) passe à l'état de bioxyde blanc (SnO^2), et la combinaison se fait même avec incandescence. Le protoxyde de fer (FeO) passe à l'état d'acide magnétique (Fe^3O^4).

306. **Action des autres métalloïdes sur les oxydes.** — Les métalloïdes autres que l'oxygène tendent à décomposer les oxydes. Ils agissent, les uns, comme l'hydrogène, par exemple, par affinité pour l'oxygène; d'autres, comme le chlore, par affinité pour le métal; quelques-uns enfin, comme le soufre, par affinité à la fois pour le métal et pour l'oxygène. Nous allons examiner successivement ces différents cas.

1° Métalloïdes agissant par leur affinité pour l'oxygène.

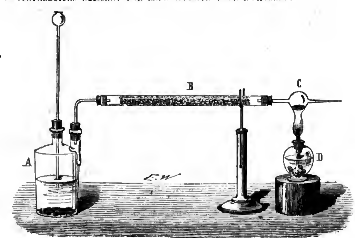


Fig. 143. — Réduction de l'oxyde de fer.

Hydrogène. L'hydrogène décompose les oxydes des métaux des quatre dernières sections en donnant de l'eau qui se dégage et laissant le métal libre. L'appareil employé est représenté dans la figure 143. L'hydrogène desséché par du chlorure de calcium passe sur l'oxyde contenu dans un tube de verre et chauffé avec une lampe à alcool. Si on décompose de cette façon le bioxyde *noir* de cuivre, on voit la réduction se faire avec chaleur et lumière, la vapeur d'eau se dégage abondamment par l'extré-

mité effilée du tube, et il reste du cuivre *rouge* pulvérulent dénué d'éclat, mais susceptible de redevenir brillant par le frottement d'un corps dur.

Le sesquioxyde de fer, réduit de la même façon, donne le fer pyrophosphorique.

Le bioxyde de barium, chauffé dans un courant d'hydrogène, est ramené à l'état de protoxyde avec incandescence.

Carbone. Le charbon réduit les oxydes des quatre dernières sections, ainsi que la potasse et la soude.

Si l'oxyde est facile à réduire, comme l'oxyde de cuivre, on obtient le métal et de l'acide carbonique. — Si l'oxyde est difficile à réduire, c'est-à-dire s'il ne se réduit qu'à une température élevée, comme l'oxyde de zinc, le métal est encore mis en liberté, mais il se dégage de l'oxyde de carbone.

Métaux. Un métal réduit généralement les oxydes des métaux qui sont d'une section plus élevée. Le potassium et le sodium sont les plus employés : ils réduisent tous les oxydes, sauf ceux des métaux de la seconde section.

2° Métalloïdes agissant par leur affinité pour le métal.

Chlore. Le chlore et ses analogues, le brôme et l'iode, sont les seuls corps qui décomposent les oxydes, grâce à leur affinité pour le métal; il y a alors dégagement d'oxygène.

Quand le chlore agit en présence de l'eau, son action oxydante donne naissance à des réactions qui ont été étudiées à propos du chlore.

3° Métalloïdes agissant par leur affinité pour l'oxygène et pour le métal.

Soufre. Le soufre décompose tous les oxydes, sauf l'alumine et ses analogues. Il donne naissance à des sulfures et à des sulfates toutes les fois que les sulfates sont indécomposables à la température à laquelle on opère. C'est ce qui arrive avec les oxydes alcalins et avec l'oxyde de plomb,

$$4BaO + 4S = 3BaS + BaOSO^3.$$

Avec les oxydes dont les sulfates sont décomposables par la chaleur, il se forme des sulfures et de l'acide sulfureux :

$$2CuO + 2S = CuS + SO^2.$$

Phosphore. Le phosphore agit à peu près comme le soufre : avec les oxydes des métaux de la première section, il donne des phosphures et des phosphates; il donne des phosphures et de l'acide phosphorique avec les oxydes des métaux des dernières sections.

Action simultanée du chlore et du charbon. En réunissant l'affinité du charbon pour l'oxygène et celle du chlore pour le métal, on arrive à réduire tous les oxydes, même l'alumine. Pour faire l'expérience, on fait un mélange intime d'alumine et de charbon, par exemple, puis, après

avoir placé ce mélange dans un tube de porcelaine (*fig.* 144), on le chauffe au rouge blanc au milieu d'un courant de chlore sec. Il se dégage de l'oxyde de carbone et il se forme du chlorure d'aluminium. Cette réaction est employée pour tous les composés analogues à l'alumine, qui tous résistent aux autres agents de réduction.

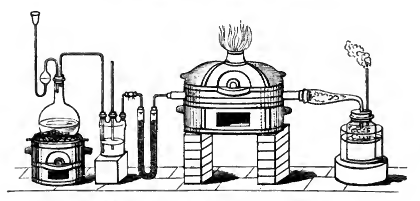


Fig. 144. — Décomposition de l'alumine par le chlore et le charbon.

307. **Classification des oxydes.** — Les oxydes métalliques ont été groupés en cinq classes bien caractérisées :

1° Les oxydes basiques;
2° — indifférents;
3° — acides;
4° — salins;
5° — singuliers.

Oxydes basiques. — Les oxydes basiques jouissent de la propriété de s'unir aux acides pour former des sels. La plupart de ces oxydes contiennent un équivalent d'oxygène pour un de métal;

exemple : *Chaux*, CaO; *oxyde de fer*, FeO.

Quelques-uns contiennent deux équivalents de métal pour un seul d'oxygène;

exemple : *sous-oxyde de mercure*, Hg^2O.

Oxydes indifférents.—Les oxydes indifférents sont ceux qui peuvent jouer indifféremment le rôle de base ou d'acide. Ils jouent le rôle de base vis-à-vis des acides forts, et le rôle d'acide vis-à-vis des bases énergiques.

C'est ainsi que l'*alumine*, Al^2O^3, forme, avec l'acide sulfurique du sulfate d'alumine, ($Al^2O^3,3SO^3$); et avec la soude, de l'aluminate de soude, (NaO,Al^2O^3).

L'*oxyde de zinc*, ZnO, est également un oxyde indifférent. La formule de ces oxydes est quelquefois MO, mais plus généralement Mn^2O^3.

OXYDES ACIDES. — Ces oxydes jouent constamment le rôle d'acides vis-à-vis des oxydes basiques. Tels sont le ***bioxyde d'étain*** ou ***acide stannique***, SnO^2, qui forme avec la potasse du stannate de potasse, KO,SnO^2; l'*acide chromique*, CrO^3, qui forme avec la potasse du chromate neutre, KO,CrO^3, et du bichromate, $KO,2CrO^3$.

Il est à remarquer que les différents oxydes formés par un métal ont une tendance d'autant plus grande à acquérir les propriétés acides, qu'ils contiennent plus d'oxygène; c'est ainsi que le ***protoxyde de manganèse***, MnO, est basique, le ***sesquioxyde***, Mn^2O^3, est indifférent, et le ***tritoxyde*** MnO^3, est un acide énergique.

OXYDES SALINS. — Ces oxydes peuvent être regardés comme le résultat de la combinaison d'un oxyde acide et d'un oxyde basique.

Tels sont : L'*oxyde magnétique de fer*, $Fe^3O^4 = FeO,Fe^2O^3$;

L'*oxyde salin de manganèse*,

$$Mn^3O^4 = MnO, Mn^2O^3;$$

Le ***minium*** ou *oxyde salin de plomb*, $Pb^3O^4 = 2PbO, PbO^2$.

OXYDES SINGULIERS.— Ces oxydes ne se combinent jamais ni avec les acides, ni avec les bases. Mis en présence des acides forts, ils perdent en général de l'oxygène et se transforment en oxyde basique; tel est le ***bioxyde de manganèse***,

$$MnO^2 + SO^3HO = O + MnOSO^3 + HO$$

En présence des bases, ils tendent à se suroxyder en donnant des oxydes acides; tel est encore le ***bioxyde de manganèse*** en présence de la potasse et de l'azotate de potasse qui peut céder de l'oxygène.

$$MnO^2 + KO + O = KO, MnO^3$$

308. **État naturel.** — On trouve dans la nature un grand nombre d'oxydes, soit à l'état anhydre, comme les oxydes anhydres de fer, de manganèse, de cuivre, etc., soit à l'état d'hydrates, comme les hydrates de sesquioxyde de fer ou de manganèse.

309. **Préparation des oxydes.** — On peut employer plusieurs procédés pour préparer les oxydes métalliques.

1° OXYDATION DU MÉTAL. — Ce procédé direct s'emploie dans l'industrie pour la préparation de l'oxyde de zinc, ZnO, de la litharge, PbO et du minium, Pb^3O^4. On prépare de même l'oxyde noir de cuivre CuO

2° DÉCOMPOSITION D'UN SEL PAR VOIE SÈCHE.— On prépare un certain nombre d'oxydes par la décomposition sous l'influence de la chaleur d'un carbonate ou d'un azotate. C'est ainsi qu'on prépare la baryte anhydre BaO.

3° DÉCOMPOSITION D'UN SEL PAR VOIE HUMIDE.—On peut précipiter l'oxyde d'un

sulfure obtenu par l'action de l'acide sulfhydrique sur les sels d'antimoine est rouge orangé. Le sulfure de mercure obtenu par voie sèche est rouge comme le sulfure naturel; il est noir quand on l'obtient par voie humide.

313. **Propriétés chimiques.** — La chaleur agit sur les sulfures comme sur les oxydes correspondants. Les seuls sulfures réductibles sont ceux dont les oxydes sont eux-mêmes réductibles. Elle ramène d'ailleurs les polysulfures à un degré moindre de sulfuration. On utilise cette propriété pour extraire le soufre de la pyrite; la réaction peut s'exprimer par la formule :

$$3FeS^2 = 2S + Fe^3S^4.$$

La pyrite est placée dans des cornues de grès de forme conique (*fig.* 145), placées transversalement au nombre de 12 ou 24, dans un fourneau de galère. L'une des extrémités de la cornue porte un tube à dégagement qui conduit le soufre dans un récipient en fonte.

314. **Action des métalloïdes.** — Les métalloïdes agissent sur les sulfures soit par affinité à la fois pour le soufre et pour le métal, soit seulement par affinité pour le soufre.

1° Corps agissant par affinité pour le soufre et pour le métal.

Oxygène sec. L'oxygène tend à transformer les sulfures en sulfates quand on opère à une température à laquelle ces sulfates ne sont pas décomposés. C'est ce qui se produira à toute température avec les sulfures alcalins et alcalino-terreux, ainsi qu'avec les sulfures de plomb et d'argent à une température peu élevée,

$$MS + 4O = MO\,SO^3$$

Fig. 145. — Calcination des pyrites.

Si le sulfure était très-divisé, l'oxydation se ferait avec chaleur et lumière. C'est ce qui arrive quand on projette dans l'air le sulfure de potassium (*pyrophore de Gay-Lussac*), obtenu en réduisant 2 parties de sulfate de potasse par 1 partie de noir de fumée.

L'oxygène donne des oxydes et de l'acide sulfureux quand on opère à une température où l'oxyde est stable, mais où le sulfate serait décomposé; c'est ce qui arrive pour le zinc et le cuivre :

$$MS + 3O = MO + SO^2$$

Si enfin on opère à une température où l'oxyde lui-même ne peut exister, on obtient le métal et de l'acide sulfureux. C'est ainsi qu'on obtient le mercure par le grillage du sulfure de mercure :

$$MS + 2O = M + SO^2$$

Oxygène humide. L'oxygène humide réagit plus facilement que l'oxygène sec. Ainsi, le sulfure de fer, qui se trouve très-divisé au milieu des lignites ou de la houille, s'oxyde rapidement en dégageant beaucoup de chaleur.

Chlore. Le chlore tend à produire un chlorure métallique et du chlorure de soufre :

$$MS + 2Cl = MCl + SCl$$

2° Corps agissant par affinité pour le soufre seul. — Les principaux corps qui décomposent les sulfures, grâce à leur seule affinité pour le soufre, sont l'hydrogène, le carbone et les métaux.

Hydrogène. L'hydrogène réduit quelques sulfures, il donne de l'acide sulfhydrique et met le métal en liberté. On peut facilement réduire de cette façon le sulfure de mercure et le sulfure d'antimoine.

Carbone. Le charbon tend à former du sulfure de carbone en mettant le métal en liberté.

Métaux. Les métaux peuvent décomposer les sulfures des métaux moins sulfurables. Ainsi, le fer décompose le sulfure de plomb en donnant du plomb métallique et du sulfure de fer.

On a rangé les sulfures les plus communs dans un ordre tel que le métal de chacun d'eux puisse déplacer celui des sulfures suivants :

Sulfure de cuivre,	Sulfure de zinc,
— de fer,	— de plomb,
— d'étain,	— d'argent.

315. **Classification.** — Les sulfures peuvent être partagés en classes analogues à celles des oxydes.

Les sulfures des métaux de la première section sont en général basiques. Les sulfures acides sont ceux des métaux dont les oxydes sont eux-mêmes des acides : tels sont les sulfures d'or, de platine, d'antimoine.

Il existe enfin des sulfures singuliers, comme le bisulfure de fer; et des sulfures salins, comme le sulfure de fer, $Fe^3S^4 = FeS, Fe^2S^3$.

316. **État naturel.** — Presque tous les métaux se rencontrent dans la nature à l'état de sulfures; aussi les alchimistes appelaient-ils le soufre, le grand minéralisateur des métaux

317. **Préparation.** — On peut préparer les sulfures par divers procédés :

1° *Par sulfuration directe.* On peut ainsi former les sulfures de fer, de cuivre et de mercure.

2° *Par la décomposition des sulfates à l'aide du charbon.* On prépare ainsi les monosulfures de potassium, de sodium et de barium.

3° *Par l'action de l'acide sulfhydrique ou des sulfures alcalins sur les sels en dissolution dans l'eau.* L'acide sulfhydrique donne des sulfures quand on le verse dans les sels d'or, de platine, d'étain, de mercure, etc.; les sulfures alcalins sont employés pour préparer les sulfures de fer et de zinc.

ACTION DU CHLORE SUR LES MÉTAUX.

318. **Action du chlore sur les métaux.** — Le chlore se combine à froid avec un grand nombre de métaux. Souvent même la combinaison se fait avec chaleur et lumière, comme par exemple avec l'antimoine ou le cuivre très-divisés. Nous avons déjà dit qu'on ne peut pas recueillir le chlore sur le mercure, parce que ce métal est attaqué.

Les métaux qui ne se combinent pas à froid avec le chlore brûlent dans ce gaz à une température plus ou moins élevée.

CHLORURES.

319. **Propriétés physiques.** — La plupart des chlorures sont solides à la température ordinaire; cependant il y en a de liquides, comme le bichlorure d'étain.

Presque tous les chlorures sont volatils, et quand un métal donne naissance à plusieurs chlorures, le composé qui contient le plus de chlore est celui qui se réduit le plus facilement en vapeurs. C'est ainsi que le bichlorure d'étain est plus volatil que le protochlorure.

Presque tous les chlorures sont solubles dans l'eau. Il n'y a d'exception que pour le chlorure d'argent, le sous-chlorure de cuivre et le sous-chlorure de mercure qui sont insolubles; le chlorure de plomb est peu soluble.

320. **Propriétés chimiques**. — La *chaleur* décompose les chlorures d'or, de platine et des métaux analogues.

La *lumière* attaque le chlorure d'argent, lui enlève une partie de son chlore, et donne un corps insoluble dans l'ammoniaque et les hyposulfites. Cette réaction est utilisée en photographie. (Voir la *Physique.*)

L'*électricité* peut décomposer tous les chlorures ; plusieurs métaux, tels que le barium, le calcium et le strontium n'ont encore été obtenus que par l'action de la pile sur leurs chlorures.

321. **Action des métalloïdes et des métaux**. — Ces divers

corps peuvent agir sur les chlorures, soit par affinité pour le métal seul, soit par affinité pour le chlore seul, soit enfin par affinité à la fois pour le chlore et le métal.

1° Affinité pour le métal seul. — L'*oxygène* agit sur un certain nombre de chlorures, mais il ne décompose pas les chlorures des métaux de la première section dans lesquels le chlore et le métal ont une grande affinité l'un pour l'autre, il ne décompose pas non plus les chlorures des métaux de la dernière section, parce que ces métaux ont peu d'affinité pour l'oxygène.

2° Affinité pour le chlore seul. — L'hydrogène et les métaux décomposent un certain nombre de chlorures pour s'emparer de leur chlore :

L'*hydrogène* réduit facilement les chlorures des métaux des quatre dernières sections; le métal reste libre et il se dégage de l'acide chlorhydrique, Pour répéter l'expérience, on chauffe légèrement le chlorure d'argent dans

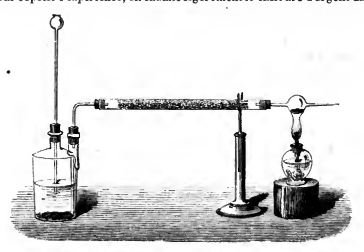


Fig. 146. — Réduction du chlorure d'argent par l'hydrogène.

l'appareil représenté (*fig.* 146), les fumées d'acide chlorhydrique apparaissent bientôt à l'extrémité du tube.

Les *métaux* d'une section réduisent en général les chlorures des métaux des sections supérieures. C'est ainsi que M. Wöhler a préparé pour la première fois l'aluminium et les autres métaux analogues, en faisant réagir le potassium sur leur chlorure.

3° Affinité pour le chlore et le métal. — Le soufre, le phosphore, le bore et le silicium décomposent un certain nombre de chlorures des quatre dernières sections, en donnant des chlorures de soufre, de phosphore, de bore ou de silicium en même temps que des sulfures, phosphures, borures ou siliciures métalliques.

322. Classification. — On peut diviser les chlorures en chlorures *basiques*, chlorures *indifférents*, chlorures *acides* et chlorures *salins ;* on ne connaît pas de chlorures *singuliers :*

Les chlorures alcalins jouent toujours le rôle de chlorures basiques.

Les chlorures acides sont formés par les métaux qui donnent avec l'oxygène des oxydes acides : tels sont les chlorures d'étain, d'antimoine, d'or et de platine.

323. État naturel. Préparation. — Certains chlorures existent dans la nature, tels sont le chlorure d'argent, le chlorure de sodium (sel gemme), le chlorure de magnésium.

On peut préparer les chlorures par l'un des procédés suivants :

1° *Par l'action directe du chlore.* On prépare de cette manière les chlorures volatils, tels que le bichlorure d'étain ou le sesquichlorure de fer. Le métal est chauffé dans une cornue tubulée (*fig.* 147) où arrive un courant de chlore sec. Le chlorure produit se condense dans un ballon refroidi.

On peut rattacher à l'action du chlore celle de l'eau régale, qui agit comme source du chlore.

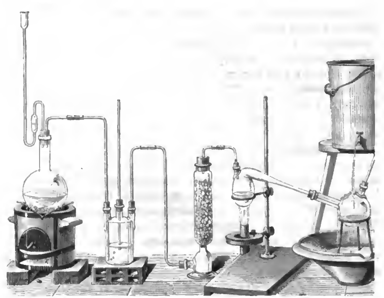


Fig. 147. — Préparation du bichlorure d'étain.

2° *Par l'action simultanée du chlore et du charbon.* C'est en faisant passer un courant de chlore sec sur un mélange d'alumine et de charbon chauffé au rouge dans un tube de porcelaine (*fig.* 144) ou dans une cor-

nue de grès, qu'on prépare le chlorure d'aluminium et ses analogues

$$Al^2O^3 + 3C + 3Cl = Al^2Cl^3 + 3CO$$

3° *Par l'action de l'acide chlorhydrique* sur le métal, l'oxyde, le sulfure ou le carbonate. Le plus grand nombre des chlorures ordinaires peuvent être obtenus de cette manière.

CHAPITRE III

Sels en général. — Lois de Berthollet. — Composition des sels. — Caractères des carbonates, sulfates, azotates.

GÉNÉRALITÉS SUR LES SELS.

324. **Définition**. — Lavoisier a le premier donné le nom de *sel* au produit de la combinaison *d'un acide* avec *une base*.

Avant lui, on appelait sel tout corps solide, soluble dans l'eau et susceptible de cristalliser; l'acide tartique, la baryte, le sucre étaient réunis dans le groupe des sels malgré les différences essentielles qui les éloignent les uns des autres.

Remarque. La définition de Lavoisier ne s'applique qu'aux composés qui contiennent un acide et une base oxygénées; or, nous avons vu que le soufre peut former des sulfacides (ex. : *acide sulfo-carbonique*, CS^2) susceptibles de se combiner avec d'autres sulfures (ex. : *sulfure de potassium*, KS) jouant le rôle de sulfo-bases. Le produit de ces combinaisons mérite aussi le nom de *sel;* on évitera toute confusion en appelant ces composés des *sulfosels*. Les sels oxygénés s'appelleront des *oxysels*.

Bien que la définition de Lavoisier ne soit pas générale, elle nous suffit ici, car nous ne nous occuperons que des *oxysels*, qui sont de beaucoup les plus importants. — D'après cette définition, le sel marin (chlorure de sodium) n'est pas un sel; mais en présence de l'eau, les chlorures et sulfures solubles se conduisent comme de véritables sels, et ce que nous dirons dans la suite leur sera parfaitement applicable.

325. **Propriétés physiques des sels.** — Tous les sels sont solides à la température ordinaire; ils sont inodores, à l'exception de quelques sels ammoniacaux.

Saveur. — La *saveur* des sels solubles dépend de la nature de la base. Les sels de soude ont une saveur salée;

—	de magnésie	—	amère;
—	d'alumine	—	astringente;
—	de plomb	—	sucrée d'abord, puis styptique;
—	de fer, de cuivre, etc.	—	métallique.

COULEUR. — Les sels *anhydres* sont généralement blancs ou incolores quand leur acide est incolore.

Les sels *hydratés* ont des couleurs qui dépendent de la base, ainsi :

Les sels hydratés	de protoxyde de fer	sont	verts;
—	de sesquioxyde	—	jaune rougeâtre;
—	de cuivre	—	bleus;
—	d'or	—	jaune clair;
—	de platine	—	jaune orangé.

Les acides colorés, comme l'acide chromique, par exemple, donnent des sels qui, anhydres ou hydratés, sont toujours colorés.

SOLUBILITÉ DANS L'EAU. — L'eau dissout à peu près tous les sels à base de potasse, de soude ou d'ammoniaque. Elle dissout tous les azotates et presque tous les sulfates. — Les carbonates et les phosphates des bases autres que les alcalis sont au contraire insolubles.

La solubilité d'un sel dans l'eau augmente en général avec la température, et souvent très-rapidement, comme cela arrive pour l'azotate de potasse; quelquefois cependant il en est tout autrement : ainsi la solubilité du sel marin est sensiblement la même à toute température ; le sulfate de lithine est moins soluble à chaud qu'à froid; enfin. le sulfate de soude a une solubilité qui va en augmentant jusqu'à la température de 33°; au-dessus de cette température la solubilité diminue.

Quand l'eau a dissout toute la quantité de sel qu'elle peut contenir, elle est dite *saturée*.

SOLUBILITÉ DANS LES DISSOLUTIONS SALINES. — L'eau saturée d'un sel ne peut plus dissoudre de nouvelles quantités de ce sel, mais elle peut dissoudre de nouvelles quantités d'un autre sel. — Si le nouveau sel ne diffère du premier que par son acide, il sera moins soluble dans la dissolution salée que dans l'eau pure : ainsi l'eau saturée de chlorure de potassium dissout moins d'azotate de potasse que l'eau pure.

Si le nouveau sel diffère du premier par son acide et par sa base, il sera plus soluble dans la dissolution saline que dans l'eau pure : ainsi l'eau saturée de chlorure de sodium dissout plus d'azote de potasse que l'eau pure.

Nous verrons bientôt une application de cette solubilité des sels dans les dissolutions salines.

PHÉNOMÈNES DE SURSATURATION. — Une dissolution saline saturée d'un sel plus soluble à chaud qu'à froid, abandonne d'ordinaire, en se refroidissant, une partie du sel qu'elle contenait, de manière à ne retenir que la quantité de matière qui s'y serait dissoute à cette température. Cependant, quand le liquide n'est pas en contact avec un excès de sel cristallisé, il arrive quelquefois que le refroidissement n'amène pas de cristallisation; la liqueur est alors dite sursaturée. — C'est le phénomène que présente

le sulfate de soude : quand on a rempli un tube (*fig.* 148) aux quatre cinquièmes, avec un dissolution saturée à chaud de sulfate de soude, on chasse l'air par l'ébullition des couches supérieures et on ferme au chalumeau la partie C du tube. Le liquide peut alors être refroidi sans qu'il y ait cristallisation, mais si l'on vient à briser l'extrémité du tube, on voit la cristallisation se produire et se propager rapidement de la surface du liquide au fond du tube. — Cette solidification rapide permet d'apprécier facilement à l'aide de la main, le ***dégagement de chaleur*** qui accompagne par ce passage du sulfate de l'état liquide à l'état solide.

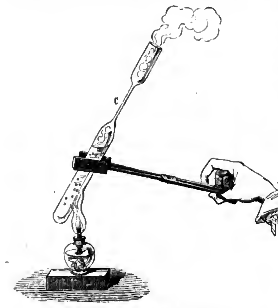


Fig. 148. — Sulfate de soude.

Décrépitation. — Les sels anhydres, quand ils se déposent en gros cristaux, emprisonnent entre leurs lamelles de petites quantités d'eau, qui, se réduisant en vapeur dès qu'on chauffe les cristaux, produisent de petites explosions connues sous le nom de ***décrépitation***; tels sont le sel marin, l'azotate de plomb, etc.

326. **Propriétés chimiques.** — L'eau n'agit pas seulement comme dissolvant sur les sels; elle peut aussi produire des phénomènes chimiques.

Eau de cristallisation. — Un certain nombre de sels cristallisent avec un nombre d'équivalents d'eau qui est toujours le même dans les mêmes conditions, mais qui varie avec la température. Ainsi, le sulfate de magnésie cristallise avec 7 équivalents d'eau à la température ordinaire, et avec 12 équivalents au-dessous de 0°.

Déliquescence. — Efflorescence. — Certains sels très-avides d'eau absorbent la vapeur contenue dans l'atmosphère et se dissolvent dans cette eau; on les appelle sels ***déliquescents;*** tels sont le chlorure de calcium, l'azotate de chaux, etc. — D'autres sels, au contraire, ont si peu d'affinité pour leur eau de cristallisation, qu'ils l'abandonnent quand l'air n'est pas

trés-humide; on les appelle sels *efflorescents;* tel est le carbonate de soude.

Eau basique. — L'eau joue dans certains sels le rôle de base. C'est ce que nous avons déjà constaté à propos des pyrophosphates et des phosphates ordinaires. Nous rappellerons ici que le phosphate de soude du commerce a pour formule $2NaO,HO,PHO^5 + 24HO$. En chauffant ce sel vers 200°, on lui fait perdre 24 équivalents d'eau sans altérer ses propriétés, car, redissous dans l'eau il cristallise par évaporation avec sa constitution primitive. Mais si on chauffe le sel au rouge, il perd son dernier équivalent d'eau, et alors sa constitution est complétement changée. Si en effet on redissout le sel dans l'eau, il cristallise par évaporation en donnant un pyrophosphate $2NaO,PHO^5 + 10HO$.

Ce nouveau sel précipite, comme nous l'avons dit (111), les sels d'argent en blanc, tandis que le phosphate ordinaire les précipitait en jaune.

327. **Mélanges réfrigérants.** — L'eau pouvant agir à la fois physiquement et chimiquement, il nous sera facile de comprendre comment, quand un sel se dissout dans l'eau, on observe tantôt un abaissement, tantôt une élévation de température. Si le sel est *très-avide d'eau,* il y aura, par le fait de la combinaison, dégagement de chaleur. Si le sel contient toute la quantité d'eau qu'il peut renfermer en cristallisant dans les conditions de l'expérience (ceci comprend le cas où le sel cristalliserait *anhydre* et n'aurait *aucune affinité pour l'eau*), le changement d'état du corps produira nécessairement un abaissement de température. Dans le cas enfin où le sel, qui se dissout, a une faible affinité pour l'eau, on pourra constater une élévation ou un abaissement de température, suivant que l'effet physique ou l'effet chimique l'emporteront.

L'absorption de chaleur qui accompagne la dissolution de certains sels est utilisée pour la production des *mélanges réfrigérants :*

1 partie de neige. . . . . 1 partie de sel marin	mélangées abaissent la température de	0° à — 17°,7
2 parties de neige. . . . . . . 3 parties de chlorure de calcium.	mélangées abaissent la température de	0° à — 45°
5 parties de sel ammoniac. . . 5 parties d'azotate de potasse. . 16 parties d'eau.	mélangées abaissent la température de	10° à — 12°,2

Action de la chaleur. — Quand on chauffe un sel *hydraté*, il fond, si l'eau de cristallisation suffit pour dissoudre le sel anhydre; le sel subit *la fusion aqueuse*. Quand on continue à chauffer, l'eau s'évapore, le sel devient anhydre et fond de nouveau s'il n'est pas décomposable par la chaleur; il subit alors la *fusion ignée*.

La chaleur décompose les sels qui contiennent un acide volatil uni à

une base fixe, ou une base volatile combinée à un acide fixe : tel est le cas du carbonate de chaux (407), qui, chauffé, donne de l'acide carbonique et laisse de la chaux vive. Tel est aussi le cas du phosphate d'ammoniaque, qui, sous l'influence de la chaleur, dégage de l'ammoniaque et donne de l'acide phosphorique vitreux (108).

ACTION DE L'ÉLECTRICITÉ. L'électricité de la pile décompose tous les sels : l'acide et l'oxygène de l'oxyde se portent au pôle positif, tandis que le métal se porte au pôle négatif. C'est ce que l'on démontre en plongeant deux lames de platine formant les pôles d'une pile dans une dissolution de sulfate de cuivre (*fig.* 149); la lame négative se recouvre de cuivre, tandis que l'oxygène et l'acide sulfurique viennent au pôle positif. La *galvanoplastie*, la *dorure* et l'*argenture* sont fondées sur cette décomposition des sels par la pile.

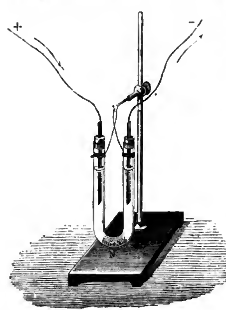


Fig. 149. — Décomposition du sulfate de cuivre.

Si la décomposition des sels alcalins, comme le sulfate de soude par exemple, donne des résultats en apparence différents, cela tient uniquement à des effets secondaires. (Voir la *Physique*.)

328. **Action de l'oxygène et de l'air.** — L'oxygène et l'air n'ont pas d'action sur les sels à la température ordinaire, sauf lorsque l'acide ou la base peuvent se suroxyder; ainsi les sulfites passent à l'état de sulfates, les sels de protoxyde de fer passent peu à peu à l'état de sels de sesquioxyde. — Le chlore agit de même en présence de l'eau, parce qu'en la décomposant il met l'oxygène en liberté.

329. **Action des métaux.** — Une lame de cuivre plongée dans une dissolution d'un sel d'argent décompose ce sel; le cuivre déplace et remplace l'argent qui se dépose. Une lame de fer plongée dans la dissolution de cuivre ainsi obtenue déplacerait de même ce dernier métal. Ces réactions peuvent s'expliquer par les formules :

$$AgO, AzO^5 + Cu = Ag + CuO, AzO^5$$
$$CuO, AzO^5 + Fe = Cu + FeO, AzO^5$$

L'action commencée par la différence d'affinité des deux métaux pour l'oxygène se complète grâce à ce que le métal précipitant forme avec le métal précipité un couple où il joue le rôle d'élément électro-positif. Une lame de zinc plongée dans une dissolution d'un sel de plomb détermine la précipitation du plomb sous forme de lamelles brillantes qui se groupent de manière à figurer des feuilles de fougères; c'est ce qui constitue l'*arbre de Saturne*. — Pour avoir un bel arbre de Saturne, on plonge dans une dissolution très-étendue d'acétate de plomb (*fig.* 150) une lame de zinc reposant sur plusieurs fils de laiton qui forment les branches de l'arbre. Le plomb se dépose peu à peu sur ces fils et figure des rameaux et des feuilles.

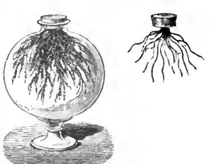


Fig. 150. — Arbre de Saturne.

Une goutte de mercure au fond d'un vase contenant de l'azotate d'argent décompose ce sel et donne lieu à un dépôt d'argent qui s'amalgame avec le mercure et cristallise en longues aiguilles figurant encore un arbre, connu sous le nom d'*arbre de Diane*.

LOIS DE BERTHOLLET.

Influence des propriétés physiques. — Berthollet a reconnu, au commencement de ce siècle, que dans l'action des acides, des bases ou des sels sur les sels, certaines propriétés physiques, telles que la *volatilité* ou l'*insolubilité* des produits qui peuvent prendre naissance dans les conditions où on opère, suffisent pour déterminer le sens des réactions. Cette influence des circonstances physiques sur les phénomènes chimiques est résumée dans un petit nombre de lois que nous allons faire connaître, et qui sont désignées sous le nom de LOIS DE BERTHOLLET.

330. **Action des acides.** — L'action des acides sur les sels est soumise aux trois lois suivantes :

1re LOI. UN ACIDE DÉCOMPOSE COMPLÉTEMENT UN SEL DONT L'ACIDE EST PLUS VOLATIL QUE LUI DANS LES CIRCONSTANCES OU ON OPÈRE.

La préparation des acides volatils nous montre l'application constante de cette règle. En effet :

L'acide *carbonique* s'obtient (230) en faisant réagir un acide plus fixe que lui, l'acide chlorhydrique, par exemple, sur un carbonate :

$$CaO,CO^2 + HCl = CO^2 + CaCl + HO$$

L'acide *chlorhydrique* s'obtient (190) en faisant réagir un acide plus fixe, l'acide sulfurique, par exemple, sur un chlorure en présence de l'eau :

$$NaCl + HO,SO^3 = HCl + NaO,SO^3$$

L'acide *azotique* s'obtient aussi (96) par l'action de l'acide sulfurique, plus fixe que lui sur un azotate :

$$NaO,AzO^5 + 2(SO^3,HO) = AzO^5,HO + NaO,HO,2SO^3$$

L'acide *sulfurique* lui-même peut être chassé de ses combinaisons par un acide plus fixe, l'acide silicique par exemple, à haute température.

$$NaO,SO^3 + SiO^3 = SO^3 + NaO,SiO^3$$

2ᵉ loi. Un acide décompose complétement un sel dont l'acide est insoluble ou peu soluble dans les circonstances où on opère.

Exemple : On prépare l'acide *borique*, qui est peu soluble dans l'eau froide, en versant un acide soluble, l'acide chlorhydrique, par exemple, dans une dissolution chaude de borate de soude (271). L'acide borique cristallise par refroidissement :

$$NaO,BoO^3 + HCl + 2HO = BoO^3,3HO + NaCl$$

L'acide *silicique* insoluble se sépare sous forme gélatineuse quand on verse de l'acide sulfurique, par exemple dans une dissolution d'un silicate alcalin :

$$NaO,SiO^3 + (2SO^3,HO) = SiO^3HO + NaO,HO,2SO^3$$

Remarque. L'insolubilité, déterminant ici une réaction inverse de celle qu'avait produite la volatilité, nous montre bien comment l'influence de circonstances purement physiques peut expliquer des phénomènes qui, au point de vue chimique, pourraient paraître contradictoires.

3ᵉ loi. Un acide décompose complétement un sel quand il peut former avec sa base un composé insoluble dans les circonstances où on opère.

Exemple : L'acide sulfurique versé dans une dissolution d'azotate de baryte détermine un précipité de sulfate de baryte insoluble, et met l'acide azotique en liberté :

$$BaO,AzO^5 + SO^3,HO = BaO,SO^3 + AzO^5,HO$$

Une réaction semblable sera utilisée en chimie organique pour préparer des acides solubles, mais non volatils.

331. **Action des bases sur les sels.** — Cette action est soumise à trois lois analogues aux précédentes.

1ʳᵉ loi. Une base fixe décompose complétement un sel dont la base est volatile dans les circonstances où on opère.

On applique cette loi dans la préparation de l'ammoniaque et des alcalis organiques volatils.

Exemple : L'*ammoniaque* s'obtient (103) en faisant réagir la chaux, par exemple, sur un sel ammoniacal :

$$AzH^3HO, SO^3 + CaO = AzH^3 + HO + CaO, SO^3$$

2e LOI. UNE BASE SOLUBLE DÉCOMPOSE COMPLÉTEMENT UN SEL DONT LA BASE EST INSOLUBLE DANS LES CIRCONSTANCES OU ON OPÈRE.

On applique cette loi dans la préparation d'un grand nombre d'oxydes et en particulier des bases insolubles ou peu solubles et décomposables par la chaleur.

Exemple : L'*oxyde d'argent* s'obtient en versant de la potasse dans un sel d'argent :

$$AgO, AzO^5 + KO = AgO + KO, AzO^5$$

3e LOI. UNE BASE DÉCOMPOSE COMPLÉTEMENT UN SEL QUAND ELLE PEUT FORMER AVEC SON ACIDE UN COMPOSÉ INSOLUBLE DANS LES CIRCONSTANCES OU ON OPÈRE.

Exemple : La *potasse* se prépare (368) en faisant réagir l'eau de chaux sur une dissolution étendue de carbonate de potasse :

$$KO, CO^2 + CaO, HO = KO, HO + CaO, CO^2$$

332. **Action des sels sur les sels**. — Cette action est résumée dans les deux lois suivantes :

1re LOI. DEUX SELS SE DÉCOMPOSENT COMPLÉTEMENT QUAND DE L'ÉCHANGE DE LEURS ACIDES ET DE LEURS BASES PEUT RÉSULTER UN SEL PLUS VOLATIL QUE CEUX DU MÉLANGE DANS LES CIRCONSTANCES OU ON OPÈRE.

Exemple : Le *carbonate d'ammoniaque* se prépare en chauffant dans une cornue (395) du carbonate de chaux avec du sulfate d'ammoniaque :

$$CaO, CO^2 + AzH^3HO, SO^3 = AzH^3HO, CO^2 + CaO, SO^3$$

2e LOI. DEUX SELS EN DISSOLUTION SE DÉCOMPOSENT COMPLÉTEMENT QUAND DE L'ÉCHANGE DES BASES ET DES ACIDES PEUT RÉSULTER UN COMPOSÉ INSOLUBLE DANS LES CIRCONSTANCES OU ON OPÈTE.

Nous avons appliqué cette loi dès nos premières leçons pour reconnaître, par exemple, la nature des sels tenus en dissolution (59) par les eaux courantes.

Exemple : La présence des *sulfates* a été reconnue par l'emploi d'un sel soluble de baryte ; il s'est produit un sulfate de baryte insoluble :

$$NaO, SO^3 + BaO, AzO^5 = BaO, SO^3 + NaO, AzO^5$$

La présence des *chlorures* a été reconnue par l'emploi de l'azotate d'argent ; le chlorure d'argent insoluble s'est immédiatement précipité :

$$NaCl + AgO, AzO^5 = AgCl + NaO, AzO^5$$

La présence des *sels de chaux* a été mise en évidence à l'aide de l'oxalate d'ammoniaque, qui donne un précipité d'oxalate de chaux insoluble :

$$CaO, SO^3 + AzH^3, HO, C^2O^3 = CaO, C^2O^3 + AzH^3HO, SO^3$$

Remarque. Dans le cas où les dissolutions mélangées ne peuvent donner par l'échange mutuel de leurs éléments, ni composé volatil, ni composé insoluble, dans les circonstances de l'expérience, les lois de Berthollet ne s'appliquent plus, et on constate en général qu'il y a encore réaction, mais que cette réaction n'est pas complète ; de sorte que le mélange de deux sels donne naissance à quatre sels.

Si l'on mêle, par exemple, de l'*acétate de soude* incolore avec du *sulfate de protoxyde de fer* vert clair, on voit immédiatement apparaître la couleur brune de l'acétate de protoxyde de fer. La liqueur contient alors :

De l'*acétate de soude* et de l'*acétate de protoxyde de fer ;*

Du *sulfate de soude* et du *sulfate de protoxyde de fer.*

COMPOSITION DES SELS.

333. **Sels neutres.** — En versant avec précaution une dissolution de potasse dans l'acide sulfurique étendu, on peut obtenir un liquide qui ne manifeste plus ni réaction acide, ni réaction alcaline sur la teinture de tournesol. Un papier rouge et un papier bleu y gardent chacun leur couleur. Les propriétés de l'acide et celles de la base se sont donc *neutralisées ;* nous appelons *sulfate neutre* le sel résultant de cette combinaison. — On obtient des résultats analogues en employant, pour neutraliser l'acide sulfurique, la soude, la magnésie ou l'oxyde d'argent.

L'analyse montre d'ailleurs que dans tous ces sels l'acide contient trois fois plus d'oxygène que la base.

En traitant l'acide sulfurique par l'oxyde de fer, l'oxyde de zinc ou l'oxyde de cuivre, on aurait toujours obtenu des sels rougissant la teinture bleue de tournesol. Si donc on ne considérait que la réaction sur la teinture de tournesol, on ne trouverait de sulfates neutres que dans les combinaisons de l'acide sulfurique avec un petit nombre de bases. Or, Berzelius, en analysant les sulfates ordinaires de fer, de zinc, de cuivre, a trouvé qu'ils ont exactement la même composition que les sels de potasse ou de soude, où la neutralité est évidente.

Comme le caractère tiré de la composition a dans toutes les réactions chimiques une valeur bien supérieure à celle que l'on pourrait tirer de l'action sur la teinture de tournesol, on est convenu d'appeler *sulfates neutres, tous les sulfates dans lesquels la quantité d'oxygène de l'acide est triple de la quantité d'oxygène de la base.*

Azotates. — Si, au lieu de l'acide sulfurique on emploie l'acide azotique, on obtient encore avec la potasse, la soude, la magnésie et l'oxyde d'argent, des sels neutres aux papiers de tournesol. Ces sels contiennent cinq fois plus d'oxygène dans l'acide que dans la base ; aussi est-on convenu d'appeler *azotates neutres, les azotates dans lesquels la quantité d'oxygène de l'acide est quintuple de celle de la base.*

SULFITES, CARBONATES. — S'il est facile de définir les sels neutres dans le cas où l'acide est énergique, comme l'acide sulfurique ou l'acide azotique : il n'en est plus de même quand le sel contient un acide faible, comme l'acide carbonique ou l'acide sulfureux, car alors la combinaison de l'acide avec la potasse ou la soude a toujours une réaction alcaline. Pour lever la difficulté, il faut une convention nouvelle, qui consiste à prendre pour composition du sel neutre, celle qui est donnée par l'analyse du plus grand nombre des composés bien définis que présente la nature ou qu'on obtient artificiellement. Ainsi, les carbonates naturels de chaux, de magnésie, de manganèse, de fer et de zinc, contenant deux fois plus d'oxygène dans leur acide que dans leur base, on est convenu d'appeler ***carbonates neutres tous les carbonates dans lesquels la quantité d'oxygène de l'acide est double de celle de la base.***

Par une raison semblable, on appelle ***sulfites neutres les sulfites dans lesquels la quantité d'oxygène de l'acide est double de celle de la base.***

Le tableau suivant donne le rapport de la quantité d'oxygène de l'acide à la quantité d'oxygène de la base dans les sels neutres des principaux genres.

GENRE DU SEL.	RAPPORT DE LA QUANTITÉ D'OXYGÈNE DE L'ACIDE A CELLE DE LA BASE.	FORMULES.
Azotates	5 à 1	MO,AzO^5
Métaphosphates	5 à 1	MO,PhO^5
Pyrophosphates	5 à 2	$2MO,PhO^5$
Phosphates ordinaires	5 à 3	$3MO,PhO^5$
Sulfites	2 à 1	MO,SO^2
Sulfates	3 à 1	MO,SO^3
Carbonates	2 à 1	MO,CO^2
Borates	3 à 1	MO,BoO^3
Silicates	3 à 1	MO,SiO^3

LOI DE BERZELIUS. — Les rapports inscrits dans le tableau précédent nous montrent toute l'exactitude de la loi suivante, connue sous le nom de *loi de composition des sels* ou *loi de Berzelius :*

DANS TOUS LES SELS NEUTRES, IL Y A UN RAPPORT CONSTANT ET SIMPLE ENTRE LE POIDS DE L'OXYGÈNE DE L'ACIDE ET CELUI DE LA BASE.

334. Expériences de Wenzel. — Avant Berzelius, la composition des sels avait déjà été l'objet d'expériences importantes qui nous montrent la justesse des idées que l'on se formait de la constitution des sels ; elles ont conduit aux premières notions exactes sur les équivalents.

Glauber paraît avoir remarqué le premier qu'un alcali fixe peut dans un sel remplacer l'ammoniaque, sans que la neutralité soit altérée.

Wenzel a étendu cette observation en 1777.

En mélangeant deux dissolutions salines, neutres et susceptibles de se

décomposer mutuellement, comme, par exemple, de l'azotate baryte et du sulfate de potasse, Wenzel obtint deux nouveaux sels neutres : du sulfate de baryte et de l'azotate de potasse

$$BaO, AzO^5 + KO, SO^3 = BaO, SO^3 + KO, AzO$$

La quantité 47gr de potasse, par exemple, qui neutralise 40gr d'acide sulfurique, peut donc aussi neutraliser 54gr d'acide azotique. De même, le poids, 76gr de baryte, qui neutralisait dans la première expérience 54g d'acide azótique, neutralise dans la seconde 40gr d'acide sulfurique.

En opérant avec d'autres sels pouvant également donner une double décomposition, on a pu déterminer les poids B, B′, B″... des diverses bases qui peuvent neutraliser un même poids A d'acide et constater que les différents poids A, A′, A″, d'acides capables de saturer le poids B de la première base, sont précisément ceux qui peuvent saturer les poids B′, B″... des autres bases.

On a été ainsi conduit à regarder les poids B, B′, B″... comme étant les équivalents des bases. Si, par exemple, on détermine les poids des diverses bases qui saturent un même poids, 40gr d'acide sulfurique, on trouve, pour les équivalents :

Potasse.	47	Magnésie.	20
Soude.	31	Oxyde de plomb.	112
Chaux.	28	Oxyde d'argent. .	116

Mais, puisque les poids A, A′, A″... d'acide saturent un même poids de base, on peut en conclure que ce sont les équivalents des acides, et en cherchant les poids qui saturent 47gr de potasse, on trouve les équivalents suivants :

Acide sulfurique. .	40
— azotique. . .	54
— chlorique. . .	75,5

335. **Expériences de Richter.** — Après ces expériences de Wenzel, qui conduisent aux équivalents des acides et des bases, nous devons citer les expériences que publia *Richter*, de Berlin, en 1792, elles donnent les équivalents des métaux.

Richter remarqua que si on plonge une lame de cuivre dans une dissolution d'azotate neutre d'argent, l'argent se précipite, tandis que le cuivre se dissout, sans qu'il y ait d'ailleurs dégagement de gaz; et à la fin de l'expérience, 108gr d'argent ont été déplacés et remplacés par 31,5 de cuivre. Une lame de zinc, placée dans la nouvelle dissolution d'azotate de cuivre ainsi formée, perd 33gr, qui se dissolvent en précipitant les 31gr,5 de cuivre.

Cette même lame de zinc, plongée dans une dissolution de plomb, pré-

cipite 104gr de plomb pour 33gr de zinc, et ces 104gr de plomb précipitent 108gr d'argent, si on les plonge dans une dissolution d'azotate d'argent.

Ces nombres représentent donc les équivalents des métaux.

Richter, remarquant que, dans l'azotate employé, la quantité d'oxygène contenu dans la base et la quantité d'acide restent les mêmes, résuma ses expériences par la loi suivante :

Dans tous les sels d'un même genre, il y a un rapport constant entre le poids de l'acide et le poids de l'oxygène contenu dans la base.

Cette loi a été vérifiée de la manière la plus complète, par l'analyse des différents sels. C'était un premier pas vers la loi de Berzelius.

CARBONATES.

336. **Propriétés physiques.** — Les carbonates sont des corps solides ; ils sont inodores, sauf le carbonate d'ammoniaque.

Ils sont *insolubles* dans l'eau pure, à l'exception des carbonates alcalins. — L'eau chargée d'acide carbonique dissout un grand nombre de carbonates insolubles dans l'eau pure, comme le carbonate de chaux. — Cette solubilité permet aux eaux courantes de transporter au loin les carbonates de chaux, de magnésie, de fer, etc.

337. **Propriétés chimiques.** — Tous les carbonates solubles ont une réaction alcaline.

La *chaleur* décompose tous les carbonates, à l'exception des carbonates alcalins et du carbonate de baryte. Dans cette décomposition, il se dégage de l'acide carbonique et l'oxyde reste. Les résultats sont un peu différents quand la base est avide d'oxygène ; ainsi dans le cas du carbonate de fer, il se dégage un mélange d'acide carbonique et d'oxyde de carbone, il reste de l'oxyde magnétique de fer.

La *vapeur d'eau* facilite la décomposition de tous les carbonates ; elle détermine même la décomposition des carbonates indécomposables par la chaleur seule. Ainsi, la vapeur d'eau, passant sur du carbonate de potasse chauffé dans un tube de porcelaine, donne de l'acide carbonique et un hydrate de potasse

$$KO, CO^2 + HO = CO^2 + KO, HO.$$

338. **Action des métalloïdes.** — Les métalloïdes n'agissent pas à froid sur les carbonates. On peut prévoir comment ils agiront à chaud, en se rappelant leur mode d'action sur l'acide carbonique et sur les oxydes :

1° *Oxygène.* L'oxygène n'aura d'action que sur les carbonates dont l'oxyde peut se suroxyder ;

Ex. : $$2FeO, CO^2 + O = 2CO^2 + Fe^2O^3.$$

2° *Carbone*. Le charbon donne, avec les carbonates, de l'oxyde de carbone, et la base, si elle est irréductible par le carbone;

Ex.: $$BaO, CO^2 + C = 2CO + BaO.$$

Si l'oxyde est réductible par le carbone on obtient le métal;

Ex.: $$KO. CO^2 + 2C = K + 3CO.$$

C'est par cette même réaction que se produit le sodium (364). Le zinc et le fer peuvent aussi s'obtenir de la même manière.

Si l'oxyde était très-facilement réductible, comme l'oxyde de cuivre, on pourrait avoir le métal et de l'acide carbonique,

$$2CuO, CO^2 + C = 2Cu + 3CO^2.$$

3° *Soufre*. Le soufre donne, avec les carbonates, les mêmes réactions qu'avec les oxydes.

339. **Action des acides, des bases.** — Les acides décomposent généralement les carbonates avec effervescence. C'est sur cette propriété qu'est fondée la préparation de l'acide carbonique.

Les bases solubles qui peuvent former avec l'acide carbonique des composés insolubles décomposent les carbonates solubles. Ainsi, le carbonate de potasse en dissolution étendue est décomposé par la chaux :

$$KO, CO^2 + CaO, HO = KO, HO + CaO, CO^2.$$

C'est sur cette propriété que repose la préparation de la potasse caustique (368). Cette action des acides et des bases sur les carbonates a déjà été indiquée dans les lois de Berthollet (330 et 331).

340. **Composition.** — Les carbonates neutres contiennent, comme nous l'avons dit, deux fois plus d'oxygène dans leur acide que dans leur base; tels sont les carbonates naturels, de chaux, de magnésie, de fer, etc.

Il existe aussi des bicarbonates, tels que le bicarbonate de soude, $NaO, HO, 2CO^2$, et des carbonates basiques ou hydrocarbonates $2CuO, HO, CO^2$.

341. **État naturel.** — On trouve dans la nature un grand nombre de carbonates, tels que ceux de soude, de chaux, de baryte, de magnésie, de fer, de zinc et de cuivre. — Le carbonate de chaux forme une grande partie de l'écorce terrestre.

342. **Préparation.** — On prépare les carbonates insolubles par la voie des doubles décompositions, comme le font prévoir les lois de Berthollet (332).

Les bicarbonates alcalins s'obtiennent en faisant passer un courant

d'acide carbonique dans un carbonate neutre. — Le bicarbonate cristallise quand il est moins soluble que le carbonate neutre.

343. **Caractères génériques** — Les carbonates font effervescence avec les acides ; ils dégagent un gaz incolore qui éteint les bougies et trouble l'eau de chaux.

SULFATES.

344. **Propriétés physiques.**— Les sulfates sont des corps solides, inodores, solubles dans l'eau, à l'exception du sulfate de baryte et du sulfate de plomb. — Les sulfates de sous-oxyde de mercure et de protoxyde d'argent sont peu solubles.

345. **Propriétés chimiques.** — La chaleur n'a pas d'action sur les sulfates de potasse, de soude, de chaux, de baryte et de plomb. Tous les autres sont décomposables.

Si la décomposition se fait à une assez basse température, comme pour les sulfates des métaux de la dernière section, il peut se dégager de l'acide sulfurique anhydre, généralement mêlé d'acide sulfureux et d'oxygène provenant de la décomposition d'une partie de l'acide sulfurique par la chaleur. — Dès que la température s'élève, il ne se dégage plus que de l'acide sulfureux et de l'oxygène.

La base reste généralement inaltérée, à moins qu'elle ne soit susceptible de se suroxyder, comme cela se présente pour le sulfate de fer,

$$2FeO, SO^3 = Fe^2O^3 + SO^2 + SO^3.$$

346. **Action des métalloïdes.** — L'action des métalloïdes sur les sulfates peut, en général, se prévoir d'après leur manière d'agir sur l'acide sulfurique et sur l'oxyde supposés libres, dans les mêmes conditions de température. L'action du *charbon* est la seule qui soit utilisée.

Le charbon décompose tous les sulfates à une température élevée : avec les sulfates alcalins et alcalino-terreux, chauffés au rouge blanc, il donne de l'oxyde de carbone et un monosulfure,

$$KO, SO^3 + 4C = KS + 4CO.$$

On utilise cette réaction pour préparer le monosulfure de potassium bien divisé par un excès de carbone, et s'enflammant spontanément quand on le projette dans l'air; c'est le *pyrophore* de Gay-Lussac.

En décomposant le sulfate de baryte naturel par le charbon, on obtient le sulfure de baryum soluble qui sert à préparer tous les sels de baryte (403).

Avec les autres sulfates, le charbon donne des produits qui dépendent de la température et de l'action qu'exerce le carbone sur l'acide sulfurique et sur l'oxyde supposés libres.

347. **Action des acides, des bases.** — Les sulfates sont décomposés à une température élevée, par les acides plus fixes que l'acide sulfurique, tels que l'acide phosphorique, l'acide borique et l'acide silicique. Les sulfates en dissolution sont décomposés par les acides qui peuvent former avec la base un composé insoluble. Nous avons déjà indiqué ces réactions dans les lois de Berthollet (330).

Les bases agissent sur les sulfates comme sur les autres sels, en obéissant aux lois indiquées au § 331.

348. **Composition.** — Les sulfates neutres contiennent trois fois plus d'oxygène dans l'acide que dans la base. On connaît aussi des bisulfates; leur formule est $MO, HO, 2SO^3$.

349. **État naturel.** — Il existe un grand nombre de sulfates dans la nature. Les principaux sont les sulfates de chaux, de baryte, d'alumine et de magnésie.

350. **Préparation.** — On prépare les sulfates :

1° Par l'action du métal sur l'acide sulfurique; c'est le cas des sulfates de zinc et de mercure;

2° Par le grillage des sulfures naturels; c'est le cas des sulfates de fer et de cuivre;

3° Par l'action de l'acide sulfurique sur l'oxyde métallique ou sur un de ses sels à acide volatil; c'est ainsi qu'on prépare le sulfate de soude par l'action de l'acide sulfurique sur le chlorure de sodium;

4° Enfin, on prépare les sulfates insolubles ou peu solubles, par double décomposition ; c'est ainsi qu'on obtient les sulfates de plomb, de sous-oxyde de mercure et d'argent.

351. **Caractères génériques.** — Les sulfates solubles donnent, avec l'azotate de baryte, un précipité blanc complétement insoluble dans les acides. Les sulfates insolubles, chauffés sur un charbon avec du carbonate de soude, *au feu de réduction* du chalumeau, donnent un sulfure de sodium, reconnaissable à l'odeur d'acide sulfhydrique qu'il répand quand on le traite par un acide.

AZOTATES.

352. **Propriétés physiques.** — Les azotates neutres sont solides, inodores; ils sont tous solubles dans l'eau.

353. **Propriétés chimiques.** — La chaleur décompose tous les azotates. Les azotates alcalins fondent, puis se décomposent au rouge; ils donnent d'abord de l'oxygène et un azotite; chauffés davantage, ils se décomposent complétement en oxygène, azote et oxyde. Ce procédé est utilisé pour la préparation de la baryte. Les autres azotates donnent de l'oxygène et de l'acide hypoazotique ou du bioxyde d'azote. C'est ainsi

que par la décomposition de l'azotate de plomb nous avons pu obtenir l'acide hypoazotique.

354. **Action des métalloïdes.** — Les azotates étant facilement réductibles par la chaleur, agiront nécessairement comme corps oxydants. Nous examinerons en particulier l'action du soufre et celle du carbone dans quelques cas usuels.

Le *soufre*, en présence des azotates alcalins, donne, s'il est en quantité suffisante, un sulfate avec production d'azote et d'acide sulfureux :

$$KO, AzO^5 + 2S = KO, SO^3 + SO^2 + Az$$

Le *charbon*, mélangé en proportion convenable avec les azotates alcalins, donne un carbonate, de l'acide carbonique et de l'azote :

$$2KO, AzO^5 + 5C = 2KO, CO^2 + 3CO^2 + 2Az$$

Avec les autres azotates, le résultat dépend de l'action du charbon sur les oxydes.

L'action du charbon sur les azotates explique la propriété qu'ils ont de *fuser* quand on les projette sur des charbons ardents. Ceux-ci, s'emparant rapidement de l'oxygène de l'acide azotique, brûlent avec une extrême rapidité en dégageant de grandes quantités d'acide carbonique.

Le *soufre* et le *charbon*, mélangés en proportion convenable, donnent une réaction intéressante sur laquelle nous aurons à revenir à propos de la poudre (385); il se dégage de l'acide carbonique et de l'azote. Le résidu est du sulfure de potassium :

$$KO, AzO^5 + S + 3C = KS + 3CO^2 + Az$$

355. **Action des acides, des bases.** — Les acides sulfurique, phosphorique, etc., plus fixes que l'acide azotique, le chassent de ses combinaisons comme l'indiquent les lois de Berthollet (330). L'acide chlorhydrique tend à former un chlorure et de l'eau régale.

Les bases solubles déplacent les bases insolubles des azotates comme de tous les autres sels (331).

356. **Composition.** — Dans les azotates neutres, la quantité d'oxygène de l'acide est quintuple de celle de la base. — La formule de ces azotates est donc MO, AzO^5.

357. **État naturel.** — On trouve dans la nature les azotates de potasse, de soude, de chaux et de magnésie. L'azotate de potasse *s'effleurit* à la surface du sol dans les pays chauds. Les azotates de chaux et de magnésie se produisent dans les lieux humides et habités. L'azotate de soude se trouve en abondance au Chili.

358. **Préparation.** — On prépare en général les azotates :

1° Par l'action de l'acide azotique sur le métal; *ex.* : azotate de cuivre, azotate de mercure, azotate d'argent.

2° Par l'action de l'acide sur un oxyde ou un carbonate, *ex.* : azotate de chaux, azotate de baryte, azotate de plomb.

359. **Caractères génériques.**— Tous les azotates fusent sur les charbons ardents. Chauffés avec de l'acide sulfurique, ils dégagent des vapeurs blanches d'acide azotique. Mélangés avec de la tournure de cuivre et de l'acide sulfurique, ils donnent du bioxyde d'azote, qui, au contact de l'air, produit des vapeurs rutilantes.

CHAPITRE IV.

Potassium. — Sodium. — Leurs composés usuels. — Potasse. — Soude. — Sel marin. Sulfate de soude. — Azotate de potasse. — Poudre. — Sels ammoniacaux.

POTASSIUM (K).	SODIUM (Na).
Équiv. en poids = 39	Équiv. en poids = 23

360. **Historique.** — Le potassium et le sodium ont été découverts en 1807, par Humphry Davy. Jusque-là, la potasse et la soude avaient été regardées comme des corps simples. Davy plaça un morceau de potasse légèrement humecté d'eau entre deux fils métalliques qui communiquaient avec les pôles d'une pile énergique; il vit bientôt apparaître au fil négatif des globules d'un métal brillant qui s'enflammait au contact de l'air et reproduisait l'alcali. — Le nouveau métal extrait de la potasse reçut le nom de *potassium*.

Davy retira de même de la soude un métal qu'on appela *sodium*.

361. **Propriétés physiques.** — Le potassium et le sodium sont des solides plus mous et plus malléables que la cire à la température ordinaire; au-dessous de 0°, ils deviennent durs et cassants. Le potassium fond à 62°,5, et le sodium à 96°, d'après les récentes expériences de M. Bunsen. Ils se volatilisent au rouge.

Fraîchement coupés, ils ont l'éclat et la couleur de l'argent.

La densité du potassium est 0,865; celle du sodium est 0,97.

362. **Propriétés chimiques.** — Dans l'air humide, le potassium et le sodium s'altèrent rapidement à la température ordinaire, et se couvrent d'une couche d'hydrate de potasse.

Dans l'air ou dans l'oxygène sec, le potassium seul s'oxyde à la température ordinaire; à une température élevée, les deux métaux brûlent et donnent des tritoxydes.

L'affinité de ces métaux pour l'oxygène est tellement grande, qu'on ne

peut les conserver que dans une huile formée uniquement de carbone et d'hydrogène, l'huile de naphte, par exemple.

Ils décomposent l'eau à la température ordinaire : si on projette un fragment de potassium sur de l'eau contenue (*fig.* 151) dans une cloche à bords élevés, on le voit fondre en un globule brillant entouré d'une flamme pourpre et se déplacer rapidement à la surface du liquide; le globule diminue peu à peu, puis la flamme s'éteint, et il reste un petit globule très-chaud de potasse qui bientôt éclate en projetant de l'eau et des fragments de potasse que les bords élevés de la cloche sont destinés à retenir.



Fig. 151.
Décomposition de l'eau par le potassium.

Voici l'explication de cette expérience : Le potassium, en arrivant au contact de l'eau, la décompose, s'empare de son oxygène et met l'hydrogène en liberté. La chaleur dégagée est assez grande pour enflammer l'hydrogène et volatiliser une partie du potassium dont la vapeur communique sa couleur purpurine à la flamme. L'hydrogène, en se dégageant, déplace le globule de potassium et lui imprime le mouvement giratoire que l'on observe. Quand tout le potassium est oxydé, la flamme disparaît, et le globule incandescent de potasse, se refroidissant, peut toucher l'eau; mais à ce moment, la chaleur propre du globule, jointe à la chaleur de combinaison de la potasse avec l'eau, détermine une vaporisation brusque qui lance de tous côtés de la lessive bouillante.

Le *sodium* décompose l'eau dans les mêmes circonstances, mais sans inflammation de l'hydrogène; la soude se dissout au fur et à mesure, de sorte qu'il n'y a plus de globule de soude, et, partant, pas d'explosion après que le dégagement de l'hydrogène a cessé. — En employant dans cette expérience de l'eau gommée dont la viscosité empêche le déplacement du globule, on détermine l'inflammation de l'hydrogène, qui brûle alors avec une flamme dont la coloration jaune est due à un peu de vapeur de sodium.

Le potassium et le sodium s'unissent directement avec presque tous les métalloïdes.

363. **État naturel.** — Le potassium et le sodium existent dans la nature, soit en combinaison avec le chlore, comme dans les eaux de la mer, soit à l'état de sels; tels que les azotates (azotate de potasse dans les pays chauds, azotate de soude au Chili), ou les silicates, qui abondent dans les terrains granitiques.

Tous les végétaux *terrestres* contiennent de la potasse combinée avec des acides organiques; aussi retrouve-t-on cette base dans les cendres de tous les bois.

Les végétaux *marins* contiennent surtout de la soude à l'état d'oxalate. La calcination des plantes marines a été pendant longtemps la seule manière d'obtenir la soude du commerce.

Les eaux de la mer contiennent de grandes quantités de chlorure de sodium et de chlorure de potassium.

364. **Préparation du potassium et du sodium.** — On a employé successivement, pour préparer ces métaux, deux procédés dont le premier, dû à Gay-Lussac et Thenard, consiste à décomposer l'hydrate de potasse ou de soude par le fer :

$$3Fe + 2(KO,HO) = Fe^3O^4 + 2K + 2H\,;$$

dans le second, on décompose le carbonate alcalin par le charbon :

$$NaO,CO^2 + 2C = Na + 3CO$$



Fig. 152. — Préparation du potassium par le fer.

1er procédé. — Un canon de fusil recourbé (*fig.* 152) est recouvert d'un lut infusible dans sa partie moyenne, remplie de tournure de fer ; on le porte au rouge blanc dans un fourneau à réverbère. L'extrémité relevée contenant les fragments d'hydrate de potasse est entourée d'une grille qui permet de chauffer la potasse et de la faire couler peu à peu sur le fer. Cette extrémité est fermée par un bouchon traversé par un tube qui plonge

dans une éprouvette pleine de mercure et à travers laquelle se dégagerait l'hydrogène dans le cas où l'appareil viendrait à se boucher. L'autre extrémité du canon de fusil s'engage dans une allonge en cuivre à laquelle s'adapte un récipient rempli d'huile de naphte et dans lequel le potassium vient se condenser. Ce procédé, remarquable pour l'époque où il a été employé, est remplacé actuellement par le suivant :

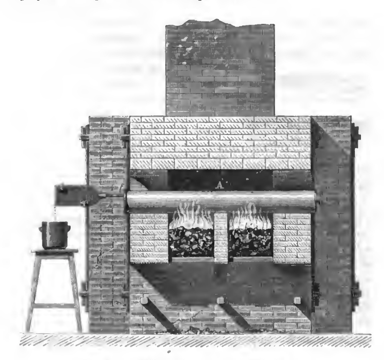


Fig. 153. Préparation du sodium par le charbon.

2e procédé. — Ce procédé, imaginé par Curaudeau, n'a été sérieusement employé que depuis M. Brunner, qui lui a donné une disposition pratique. L'appareil Brunner ne donnait lui-même qu'un rendement variable pour le potassium, parce que ce métal, qui ne réagit sur l'oxyde de carbone, ni à froid ni au rouge blanc, se trouvait dans le récipient en contact avec ce gaz à la température du *rouge sombre* où une réaction peut se produire. Appliqué à la préparation du sodium, cet appareil donnait des résultats encore moins satisfaisants. MM. Donny et Mareska, en modifiant le récipient de manière à refroidir rapidement l'oxyde de carbone et le potassium, ont obtenu un rendement meilleur. — Enfin, M. Deville, en faisant connaître les conditions exactes dans lesquelles la réaction peut réussir, a donné un procédé véritablement

industriel, qui permet d'obtenir à très-bas prix le potassium et le sodium.

Ce procédé consiste à introduire dans une bouteille ou dans un cylindre de fer (*fig* 153), que l'on place horizontalement dans un fourneau, un mélange de

20 parties de carbonate de soude,
9 parties de houille;
3 parties de craie;

La craie est ici indispensable pour empêcher la fusion de la matière, et, partant, maintenir intime le mélange du carbonate alcalin et du charbon qui doit réagir sur lui. — Quand on prépare le potassium, on emploie le carbonate de potasse produit par la calcination *tartre brut*, et comme ce sel contient du *tartrate de chaux* qui, calciné, donne du carbonate de chaux, il est inutile d'y ajouter de la craie.



Fig. 154.
Récipient pour le sodium.

La bouteille communique avec un tube de fer de quelques centimètres seulement, et dont l'extrémité s'engage dans un récipient plat (*fig.* 154) en tôle, composé de deux parties dont l'une forme le corps d'une boîte plate, et l'autre le couvercle. Ce récipient, ouvert à son extrémité dans toute sa hauteur, laisse échapper par sa partie supérieure les gaz, qui viennent brûler à l'air tandis que le sodium condensé coule par la partie inférieure et se réunit dans une marmite contenant de l'huile de schiste.

Le sodium, ainsi produit, est refondu sous l'huile de schiste et coulé dans des lingotières; on le conserve dans l'huile de naphte.

365. **Usages.** — Le potassium et le sodium sont des réducteurs énergiques qu'on emploie pour la préparation d'un grand nombre de corps simples, tels que le bore, le silicium, le magnésium. La plus grande partie du sodium fabriqué industriellement est appliquée à la préparation de l'aluminium.

POTASSE (KO,HO). SOUDE (NaO,HO).

366. **Oxydes de potassium et de sodium.** — Le potassium et le sodium forment avec l'oxygène un protoxyde (KO — NaO) et un peroxyde (KO^3 — NaO^3); ces composés sont sans intérêt; mais il n'en est pas de même de l'hydrate de protoxyde de potassium (KO,HO), appelé communément *hydrate de potasse* ou *potasse caustique*, et de l'hydrate de protoxyde de sodium (NaO,HO), connu sous le nom d'*hydrate de soude* ou de *soude caustique*.

367. **Propriétés.** — La potasse et la soude caustique sont des corps solides, blancs, fusibles au-dessous du rouge et volatils au rouge sans altération. — Elles sont caustiques, déliquescentes et solubles dans l'eau avec dégagement de chaleur.

Un morceau de potasse ou de soude, exposé à l'air humide, se transforme peu à peu en un liquide sirupeux; puis, l'acide carbonique de l'air intervenant, la potasse donne un carbonate déliquescent lui-même, la soude donne un carbonate pulvérulent qui n'est pas déliquescent.

368. **Préparation.** — On prépare la potasse et la soude en décomposant par la chaux leur carbonate en dissolution. Il se forme un précipité de carbonate de chaux insoluble et l'alcali reste dissous.

$$KO,CO^2 + CaO,HO = KO,HO + CaO,CO^2.$$

Pour faire cette préparation, on dissout dans une bassine de fonte une partie de carbonate de potasse, par exemple, dans dix parties d'eau; on y ajoute une partie de chaux et on fait bouillir la dissolution en remplaçant l'eau au fur et à mesure qu'elle s'évapore, parce que la potasse en dissolution concentrée réagirait à son tour sur le carbonate de chaux et donnerait une réaction inverse de celle qu'on veut produire. L'ébullition ne doit être arrêtée que lorsque en filtrant une petite portion de la liqueur, on obtient une dissolution qui ne fait plus effervescence avec les acides.

On retire alors la bassine du feu, on laisse le liquide se clarifier par le repos, puis on le décante dans une bassine de cuivre ou d'argent, et on l'évapore rapidement. Quand la liqueur a pris une consistance sirupeuse, on la coule sur une plaque de cuivre où elle se solidifie. La masse concassée doit être enfermée dans des flacons secs, que l'on bouche immédiatement.

La potasse ainsi obtenue est la *potasse à la chaux*. Elle est généralement impure, et contient les chlorures et sulfates qui se trouvent dans le carbonate de potasse du commerce. Elle contient d'ailleurs un peu de carbonate de potasse qui s'est produit pendant l'évaporation sous l'influence de l'acide carbonique de l'air. — On la purifie en la mettant en contact avec de l'alcool qui dissout la potasse sans dissoudre les sels. On voit au bout de quelque temps la liqueur se partager en deux couches : l'inférieure contient les sels, la supérieure est une dissolution alcoolique de potasse pure; on décante cette dernière et on l'évapore, d'abord dans un alambic pour recueillir la plus grande partie de l'alcool, puis dans une bassine d'argent où on la chauffe jusqu'à sa température de fusion pour la couler sur une plaque d'argent. La potasse ainsi obtenue ou *potasse à l'alcool* ne peut contenir qu'une petite quantité de carbonate formé pendant l'évaporation.

On obtient de la même façon la *soude à la chaux* et la *soude à l'alcool*

369. **Usages.** — La potasse et la soude sont employées dans les laboratoires comme réactifs; par exemple, pour précipiter les oxydes insolubles.

En médecine, on utilise les propriétés caustiques de la potasse pour ronger les chairs. La potasse coulée en bâton est alors connue sous le nom de *pierre à cautère*.

POTASSES ET SOUDES DU COMMERCE.

370. **Composition.** — Les potasses et les soudes du commerce sont des carbonates de potasse et de soude, obtenus généralement par l'incinération des végétaux. Aussi s'y trouve-t-il toujours un grand nombre d'impuretés telles que sulfate de potasse ou de soude, chlorure de potassium ou de sodium, phosphate de chaux, silice et alumine.

371. **Préparation des potasses.** — Pour obtenir la *potasse du commerce*, on entasse dans une fosse des arbres et toutes espèces de plantes qui croissent loin de la mer; on y met le feu et on laisse brûler; les cendres traitées par l'eau lui abandonnent leurs sels solubles : carbonate, sulfate, chlorure. La lessive ainsi obtenue est évaporée puis calcinée au rouge. Le produit est la potasse brute, qui, suivant son origine, prend les noms de *potasse d'Amérique*, *potasse de Russie*, etc.

372. **Carbonate de potasse.** — En traitant la potasse brute pulvérisée par une très-petite quantité d'eau, on peut dissoudre le carbonate et laisser les sels étrangers, qui sont bien moins solubles que le carbonate. Cette dissolution évaporée donnerait du carbonate neutre contenant un peu de carbonate de soude.

En saturant la liqueur à froid par un courant d'acide carbonique, on obtient un *bicarbonate de potasse* ($KO,HO,2CO^2$), moins soluble que le carbonate neutre et qui cristallise peu à peu.

373. **Usage des potasses du commerce.** — La potasse du commerce est employée dans la fabrication du salpêtre, de l'alun, du bleu de Prusse. — Rendue caustique par la chaux, elle est utilisée pour la fabrication des savons mous.

374. **Préparation des soudes.** — Pendant longtemps on a extrait les soudes des cendres des végétaux qui croissent au bord de la mer. Ces plantes, telles que le *salsola soda*, le *salicornia Europæa*, les *varechs*, contiennent de l'oxalate de soude. On les dessèche puis on les brûle. Il reste une masse gris-noirâtre, c'est la soude brute connue sous les noms de *soude de Narbonne*, *soude d'Alicante*, etc.

375. **Soude artificielle.** — On prépare aujourd'hui presque toute la soude du commerce par un procédé imaginé au commencement du siècle, à l'époque du blocus continental, par un médecin français nommé *Leblanc*.

Ce procédé, qui reste encore aujourd'hui tel qu'il a été donné par son auteur, consiste à décomposer à une température élevée, par un mélange de carbonate de chaux et de charbon, le sulfate de soude (produit par l'action de l'acide sulfurique sur le sel marin). Il se forme dans cette réaction de *l'oxyde de carbone*, du *carbonate de soude* et un *oxysulfure de calcium* complétement insoluble La formule suivante exprime cette réaction :

$$2NaO,SO^3 + 3CaO,CO^2 + 9C = 2NaO,CO^2 + CaO,2CaS + 10CO.$$

Vainement on avait essayé d'utiliser la décomposition du sulfate de soude par le carbonate de chaux seul. Il se fait bien à une température élevée du carbonate de soude et du sulfate de chaux; mais quand on reprend par l'eau, la décomposition inverse se produit. La présence du carbone et d'un excès de carbonate de chaux a permis de parer à cet inconvénient en réduisant le sulfate de chaux, et déterminant la formation d'un oxysulfure. Le mélange qu'on emploie est formé :

1000	parties	de sulfate de soude
1040	id	de carbonate de chaux
530	id	de charbon.

On introduit le tout dans un four elliptique en briques réfractaires (*fig.* 155), par des ouvertures T, T percées dans la voûte. La flamme traversant toute la longueur du four échauffe peu à peu la matière, qui se ramollit et laisse échapper beaucoup d'oxyde de carbone. On remue la masse avec des ringards jusqu'à ce que le gaz cesse de se dégager. L'opération est alors terminée : la matière retirée du feu constitue la *soude brute*. Cette masse traitée par l'eau donne une dissolution qui, évaporée à siccité, donne la soude commerciale, contenant du sulfate de soude et du sel marin.

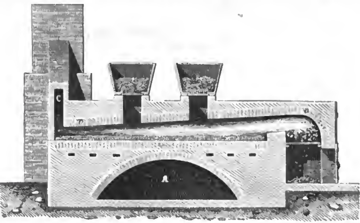


Fig. 155. — Préparation de la soude artificielle.

376. **Carbonates de soude**. — Quand on évapore lentement jusqu'à 31° Baumé, la lessive obtenue à l'aide de la soude brute, on obtient par refroidissement le carbonate de soude *neutre*, qui constitue ce qu'on appelle les *cristaux de soude*. La composition de ces cristaux est :

$$NaO,CO^2 + 10HO.$$

Ces cristaux s'effleurissent à l'air et peuvent perdre jusqu'à 9 équivalents d'eau. L'évaporation de certains lacs de l'Égypte donne des incrustations de *sesquicarbonate de soude*, appelé *natron*.

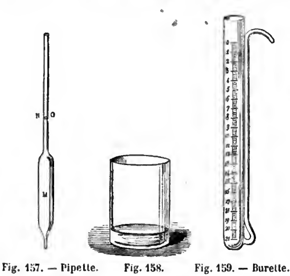
L'acide carbonique, passant en excès dans une dissolution de carbonate neutre, donne du bicarbonate ($NaO,HO,2CO^2$), qui est employé pour la fabrication de l'eau de Seltz artificielle. — Ce sel existe dans les eaux de Vichy et dans celles de Carlsbad.

377. **Usages.** — La soude du commerce est employée pour la fabrication du verre ordinaire et du verre à bouteilles. — Rendue caustique par la chaux, elle sert à la fabrication des savons durs.

378. **Essais alcalimétriques.** — Comme la valeur commerciale de la potasse et de la soude du commerce dépend de la quantité d'alcali qu'elles contiennent, il était important d'avoir un moyen de reconnaître le *titre pondéral* ou le *nombre de centièmes* de potasse pure, par exemple, que contient une potasse du commerce. La méthode suivante imaginée par Gay-Lussac résout très-simplement le problème : On sait que 49gr d'acide sulfurique monohydraté (SO^3,HO), peuvent saturer 47gr de potasse (KO). Si donc, dans un vase (*fig.* 156) de 1 litre de capacité, on verse de l'eau, puis 98gr d'acide sulfurique et qu'on achève de remplir le vase, on aura une dissolution dont 50cc contiendront 4gr,9 d'acide sulfurique monohydraté.


Fig. 156.
Flacon d'un litre.

Si, d'un autre côté, on dissout 47gr de potasse du commerce dans de l'eau, de manière à avoir un demi-litre de liqueur, il est clair que 50cc de cette dissolution contiendront 4gr,7 de la potasse à essayer.


Fig. 157. — Pipette. Fig. 158. Fig. 159. — Burette.

Cela posé, les 50cc de potasse, pris à l'aide d'une pipette (*fig.* 157) sont versés dans un vase cylindrique (*fig.* 158) et colorés par quelques gouttes de teinture bleue de tournesol. On y verse alors lentement la

dissolution acide contenue dans une burette (*fig.* 159) de la capacité de 50^{cc} et divisée en 100 parties égales; on s'arrête au moment où la saturation est complète, ce qu'on reconnaît à ce qu'une goutte ajoutée en excès fait passer la couleur au rouge pelure d'oignon. Si on a versé alors 60 divisions, par exemple, c'est qu'évidemment la solution de potasse contient seulement 60 centièmes, c'est-à-dire 60 pour 100 de potasse.

La potasse d'Amérique contient d'ordinaire 60 pour 100 d'alcali;
» de Russie » 55 pour 100 »

L'essai des soudes du commerce se fait de la même façon. On dissout seulement 31^{gr} de la soude au lieu de 47^{gr} de potasse.

La soude d'Alicante contient d'ordinaire 55 à 60 pour 100 d'alcali;
» artificielle » 18 à 35 pour 100 »

AZOTATE DE SOUDE (NaO,AzO^5).

379. **Propriétés-usages.** — L'azotate de soude est solide, il cristallise en rhomboèdres; il a une saveur fraîche et est déliquescent dans l'air humide. Il se décompose au rouge en donnant de l'azotite de soude et de l'oxygène; chauffé davantage, il donne de l'azote et d'un mélange de protoxyde et de tritoxyde de sodium.

Il existe en grande abondance au Pérou. On l'emploie pour la préparation de l'acide azotique. — La propriété qu'il possède d'attirer l'humidité de l'air ne permet pas de l'utiliser pour la fabrication de la poudre, mais on le transforme en azotate de potasse, en traitant à *chaud* une dissolution concentrée d'azotate de soude par le chlorure de potassium; il se forme alors du chlorure de sodium qu'on enlève au fur et à mesure. La liqueur, contenant l'azotate de potasse, laisse déposer ce sel en se refroidissant.

AZOTATE DE POTASSE (KO,AzO^5).

380. **Propriétés.** — L'azotate de potasse connu aussi sous les noms de *nitre* ou de *salpêtre*, cristallise en prismes hexagonaux, ordinairement groupés de manière à former des cannelures. Il a une saveur fraîche. — Il est beaucoup plus soluble à chaud qu'à froid. Ainsi 100^{gr} d'eau peuvent dissoudre 236^{gr} de nitre, à 97°,7, tandis qu'elles n'en dissolvent que 10^{gr} à 0°. — Soumis à l'influence de la chaleur, le nitre fond au-dessous du rouge, puis se décompose en oxygène et en azotite de potasse. Si on chauffe davantage, il se décompose en azote et en protoxyde de potassium mêlé de tritoxide.

Grâce à la facilité avec laquelle il cède son oxygène, l'azotate de potasse est un oxydant énergique : au contact des charbons ardents, il fuse

en activant la combustion. — Un mélange de nitre avec du charbon ou du soufre ou du phosphore, projeté dans un creuset chauffé au rouge, brûle avec une vive lumière en donnant du carbonate ou du sulfate, ou du phosphate de potasse. Il agit donc, dans ces différents cas à la fois, par son oxygène et par sa base.

381. **État naturel. — Extraction.** — Le salpêtre est très-abondant dans la nature. On emploie pour l'extraire des procédés qui varient avec les conditions où on le rencontre.

1° Salpêtre des indes. — Dans les pays chauds, comme le Bengale, l'Égypte, l'île de Ceylan, etc., on voit se former à la surface du sol, pendant la période de sécheresse qui suit la saison des pluies, des efflorescences cristallines qui sont presque entièrement formées d'azotate de potasse.

Pour recueillir ce salpêtre, on enlève la terre sur une profondeur de quelques centimètres et on la lessive. La liqueur ainsi obtenue est placée dans de grandes bassines, où elle s'évapore rapidement sous l'influence de la chaleur solaire, en laissant déposer de gros cristaux d'azotate de potasse, qui constituent le *salpêtre brut des Indes.* — Les eaux mères sont rejetées, et cependant elles contiennent encore beaucoup d'azotate de chaux et de magnésie, qu'on pourrait transformer en azotate de potasse en les mélangeant avec du carbonate de potasse.

2° Lessivage des matériaux salpêtrés. — Dans les régions tempérées, le salpêtre se forme sur le sol, et les murs des lieux humides, comme les caves, ou en présence des matières animales azotées, comme les écuries, les étables. Pour extraire le salpêtre de ces matériaux, on met dans une grande cuve, un mètre cube de plâtras qui proviennent de la démolition des vieux murs, et on y verse la quantité d'eau nécessaire pour recouvrir toute la masse. Au bout de 12 heures on soutire l'eau, dont la moitié environ s'écoule, le reste étant retenu par la matière qu'elle imbibe. On ajoute alors une quantité d'eau égale à celle qui s'est écoulée, et on recommence ainsi de 12 heures en 12 heures, jusqu'à ce qu'il ne se dissolve plus rien. Les eaux de lavage ainsi obtenues, passent successivement dans d'autres cuviers semblables au premier, jusqu'à ce qu'elles soient assez concentrées.

Les *lessives* des matériaux salpêtrés contiennent, outre l'azotate de potasse, des azotates de chaux et de magnésie, ainsi que des chlorures de calcium, de magnésium et de sodium. Pour transformer tous les azotates en azotate de potasse, on filtre la lessive sur des cendres riches en carbonate et sulfate de potasse : il se dépose du sulfate de chaux et des carbonates de chaux et de magnésie. La liqueur ne contient plus que de l'azotate de potasse avec des chlorures de potassium et de sodium.

On peut, au lieu d'employer les cendres, dont le prix est élevé, traiter la lessive d'abord par de la chaux, qui précipite la magnésie, puis par du sulfate de potasse qui précipite la chaux. On peut encore employer, au

lieu de sulfate de potasse, du sulfate de soude, et transformer ensuite l'azotate de soude en azotate de potasse par le chlorure de potassium.

La liqueur qui ne contient plus que l'azotate de potasse et les chlorures de potassium et de sodium est mise à évaporer dans une grande chaudière en cuivre (*fig.* 160) maintenue à la température d'ébullition. A mesure que l'eau s'évapore, on ajoute de nouvelles quantités de liquide, de manière à maintenir la cuve pleine. Il se produit des dépôts boueux qui, entraînés par le mouvement ascendant du liquide le long des parois chauffées, viennent redescendre au milieu de la chaudière, où on a suspendu un petit chaudron destiné à les recevoir. On retire de temps en temps ce chaudron pour le débarrasser de son dépôt. Bientôt la liqueur est assez concentrée pour que le chlorure de sodium, qui n'est pas beaucoup plus soluble à chaud qu'à froid, commence à se déposer au fond de la chaudière; on l'enlève au fur et à mesure, et quand l'évaporation est assez avancée pour qu'une goutte du liquide se fige au contact d'un corps froid, on le décante dans des bassins, où la plus grande partie de l'azotate de potasse cristallise par refroidissement. Les eaux mères, contenant encore des nitrates, sont mêlées aux lessives qui n'ont pas encore été soumises à l'évaporation. Le salpêtre ainsi obtenu est le *salpêtre brut*.

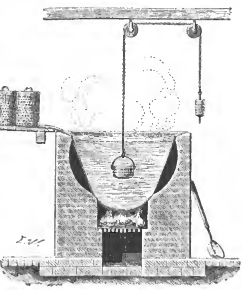


Fig. 160. — Concentration du nitre.

3° Nitrières artificielles. — Dans les contrées froides, on détermine artificiellement la production du nitre: pour cela on mêle des terres poreuses, contenant de la chaux et des alcalis, avec du fumier, et on forme avec ce mélange des murs disposés perpendiculairement à la direction des vents dominants de la contrée où on opère. Ces murs sont arrosés de temps en temps avec de l'urine qui doit fournir des matières azotées et remplacer l'eau évaporée. Il se forme des efflorescences de salpêtre sur la partie la plus exposée à l'action du vent. On enlève alors les couches superficielles, et on les lessive. Les matières non dissoutes sont ensuite

reportées sur la face opposée du mur, qui conserve ainsi la même épaisseur et ne fait que reculer peu à peu.

382. **Raffinage.** — Le salpêtre brut contient toujours des chlorures dont la déliquescence rend ce salpêtre impropre à la fabrication de la poudre. On le purifie par *le raffinage*. Cette opération consiste à traiter le salpêtre dans une chaudière en cuivre à la température d'ébullition, par une quantité d'eau suffisante pour dissoudre l'azotate de potasse, mais insuffisante pour dissoudre le chlorure de potassium et le chlorure de sodium, qui, à cette température, sont moins solubles que l'azotate. Ces deux sels restent au fond de la chaudière; on les enlève avec des râteaux. On clarifie ensuite la liqueur avec de la colle, et on la fait refroidir dans des bassines, où on l'agite sans cesse de manière à empêcher la formation de gros cristaux qui emprisonneraient de l'eau mère. Les cristaux mis à égoutter dans des vases coniques sont arrosés avec une dissolution saturée d'azotate de potasse pur, qui déplace les dernières traces de chlorure. Le séchage du salpêtre se fait sur les fours qui servent au raffinage.

383. **Phénomènes de la nitrification.** — Un grand nombre de phénoménes peuvent intervenir dans la production du nitre. Ainsi, dans les pays chauds, une des principales causes de la production du nitre paraît être l'évaporation active de l'eau à la surface du sol. On a constaté, en effet, par des expériences directes, que l'évaporation rapide de l'eau détermine la formation d'un peu d'azotite d'ammoniaque; ce sel, décomposé par les carbonates alcalins et terreux du sol, donne des azotites et du carbonate d'ammoniaque; les azotites, sous l'influence de l'air, se transforment en azotates, le carbonate d'ammoniaque peut d'ailleurs lui-même, en présence de l'air et des corps poreux, se changer en acide azotique et se combiner avec les bases du sol poreux où s'accomplit cette réaction; c'est ce que justifie la transformation de l'ammoniaque en acide azotique par l'action de l'oxygène en présence de la mousse de platine. — Il est bien clair qu'à ces causes de production du nitre vient encore s'ajouter l'action de l'acide azotique et des autres composés oxygènes de l'azote produits dans les orages si fréquents des pays chauds; ces corps entraînés par les pluies, se combinent avec les bases qu'ils rencontrent dans l'intérieur de la terre.

L'oxydation directe des matières azotées, mise en évidence par M. Cloës et M. P. Thenard, doit enfin intervenir fréquemment, dans les écuries, par exemple, ainsi que dans les étables et les caves.

384. **Usages.** — L'azotate de potasse est principalement employé pour la fabrication de la poudre. On l'utilise en médecine.

POUDRE

385. **Propriétés.** — Nous avons vu à propos des propriétés générales

des azotates (354) que le mélange de soufre et de nitre déflagre par une faible élévation de température en donnant subitement un volume considérable de gaz :

$$KO,AzO^5 + 2S = KO,SO^3 + SO^2 + Az.$$

Le mélange de nitre et de charbon en proportion convenable s'enflamme moins facilement que le mélange de soufre et de nitre, mais il donne plus de gaz et développe une température plus élevée :

$$KO,AzO^5 + \frac{5}{2}C = KO,CO^2 + \frac{3}{2}CO^2 + Az.$$

Quand la combustion s'effectue dans un espace limité, il se produit, grâce à la force expansive des gaz portés à une très-haute température, une pression considérable qu'on utilise pour lancer des projectiles.

On obtient une *poudre* à la fois très-combustible et douée d'une grande force explosive, en mélangeant en proportion convenable le nitre, le soufre et le charbon :

$$KO,AzO^5 + S + 3C = KS + Az + 3CO^2.$$

Le soufre remplit ici un double rôle, il augmente l'inflammabilité et empêche une partie de l'acide carbonique de rester en combinaison avec la potasse. Le charbon donne la puissance de projection, grâce au volume de gaz qu'il produit et à la haute température que développe sa combustion. — La poudre ainsi formée s'enflamme vers 300° et produit un volume de gaz qui, à 0° et sous la pression ordinaire, serait au moins 200 fois le volume de la poudre employée. Comme d'ailleurs la température développée dépasse 1200°, le volume devient au moins quadruple de ce qu'il serait à 0°.

Composition de la poudre de guerre. — Les différents essais tentés pour arriver à la meilleure composition de la poudre, ont conduit à admettre dans tous les pays des mélanges qui s'éloignent peu du mélange théorique que nous venons d'indiquer. C'est ce que nous pouvons constater en comparant la composition de la poudre de guerre à la composition que donne la formule précédente :

Poudre de guerre.		Poudre théorique.	
Salpêtre. . . .	75,0	Salpêtre. . . .	74,8
Soufre. . . .	12,5	Soufre. . .	11,9
Charbon. . . .	12,5	Charbon. . . .	13,3
	100,0		100,0

En augmentant un peu la proportion théorique de soufre, on a donné à la poudre une inflammabilité un peu plus grande; quant à sa force explosive, elle ne se trouve pas diminuée, parce que le charbon employé contient toujours un peu d'hydrogène qui, en brûlant, produit une température très-élevée.

La présence de l'hydrogène explique comment le dosage de la poudre pourra varier dans certaines limites, suivant la composition du charbon.

La composition de la poudre de chasse se rapproche de celle de la poudre de guerre.

Quant à la poudre de mine, elle est moins riche en salpêtre; elle brûle moins vite et a une force explosive moindre; mais ces défauts ne sont pas un inconvénient considérable pour l'usage qu'on en fait.

POUDRE DE CHASSE.		POUDRE DE MINE.	
Salpêtre. . . .	76,9	Salpêtre. . . .	62,0
Soufre. . . .	9,6	Soufre. . . .	20.0
Charbon. . .	13,5	Charbon. . .	18,0
	100,0		100,0

386. **Fabrication de la poudre**. — Le salpêtre employé doit être raffiné et parfaitement exempt de chlorures qui le rendraient déliquescent. Le soufre en canon est préféré à la fleur de soufre, qui peut retenir un peu d'acide sulfureux ou d'acide sulfurique. Enfin le charbon doit être très-léger et préparé à basse température, soit dans des cylindres chauffés à 400°, soit dans des fosses. L'emploi des cylindres a l'avantage de donner un charbon de composition constante qui donne à la poudre une force explosive toujours la même, tandis que la composition du charbon dans les fosses a une composition variable avec la température produite.

Le charbon et le soufre pulvérisés sont mêlés au salpêtre, puis soumis à l'action des pilons (*fig.* 161), dans des mortiers en bois où on les arrose de temps en temps avec un peu d'eau. Quand la matière a été ainsi mélangée pendant quatorze heures environ, on en forme une galette que l'on réduit en grains, en la brisant convenablement sur un crible, puis on la porte au séchoir.

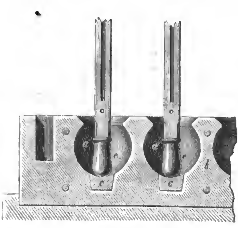


Fig. 161. — Batterie de pilons.

La poudre ainsi préparée doit être conservée à l'abri de l'humidité.

387. **Combustion de la poudre**. — La poudre réduite en poussière brûle très-lentement, la flamme ne se propageant qu'avec difficulté.

Quand au contraire la poudre est en grains, la flamme pénètre facilement dans tous les interstices et met le feu très-rapidement à toute la masse. Les grains doivent d'ailleurs être assez petits pour que la combustion qui se propage de la surface au centre soit complète dans le temps que le projectile met à sortir de l'arme. Cette grosseur dépend donc de la composition de la poudre et de l'arme à laquelle elle est destinée.

La meilleure poudre pour une arme donnée est celle qui brûle complétement dans le temps que le projectile met à parcourir l'âme de la pièce de manière à lui imprimer, non instantanément, mais progressivement, toute la force de projection dont elle est susceptible.

CHLORURE DE SODIUM (NaCl).

388. **Propriétés.** — Le chlorure de sodium ou *sel marin* est solide, blanc, d'une saveur salée caractéristique. Sa solubilité dans l'eau varie peu avec la température : 100 grammes d'eau dissolvent 36gr de sel à la température de 18°, et 40gr,4 à la température de 109°. — Ce sel est déliquescent dans l'air très-humide.

Une dissolution saturée de sel marin donne par évaporation des cristaux cubiques qui s'accolent fréquemment, de manière à former de petites pyramides (*fig.* 162) quadrangulaires creuses dont les parois sont formées par une série de gradins.


Fig. 162. — Trémie de sel marin.

Les cristaux de sel marin sont anhydres, mais ils retiennent d'ordinaire un peu de liquide interposé entre leurs lamelles, c'est ce qui fait qu'ils décrépitent quand on les projette sur des charbons incandescents.

Le chlorure de sodium fond au rouge et se vaporise ensuite si on continue à élever la température.

389. **État naturel.** — Le chlorure de sodium est très-abondant dans la nature; il existe à l'état solide en masses considérables dans l'intérieur de la terre, comme à Vieliczka en Pologne, à Cardona en Espagne, et dans le nord-est de la France; il est alors connu sous le nom de *sel gemme.* — Il se trouve à l'état de dissolution dans les eaux de la mer et dans un très-grand nombre de sources, dites sources salées, dont les eaux ont traversé des terrains salifères.

390. **Extraction.** — On se procure le chlorure de sodium soit en exploitant les mines de sel gemme, soit en déterminant l'évaporation des eaux de la mer ou des sources salées.

1° Sel gemme. — Quand le sel gemme forme des masses compactes et pures, on l'exploite, soit à ciel ouvert, soit à l'aide de galeries souterraines.

C'est le procédé suivi à Vieliczka, par exemple. Les blocs de sel extraits de la mine sont pulvérisés sous des meules et livrés au commerce.

Quand le sel gemme est mêlé de matières étrangères, comme dans les mines de la Souabe, de la Bavière et du Wurtemberg, il faut le dissoudre dans l'eau et évaporer sa dissolution. Pour cela, on creuse un trou de sonde qui descend jusqu'au milieu de la mine, et dans l'axe de ce puits on place un long tube percé d'ouvertures à son extrémité inférieure. On fait ensuite arriver l'eau de sources voisines dans la partie annulaire qui reste entre le tube et le trou de sonde. Cette eau dissout le sel gemme et donne une liqueur dont les parties inférieures saturées pénètrent dans le tube central et s'y élèvent à une hauteur qui, a raison de leur densité, est un peu moindre que la hauteur extérieure. Des pompes aspirantes amènent cette dissolution dans des bassins, d'où elle passera dans les chaudières d'évaporation. Comme la liqueur contient environ 27 pour 100 de sel, on peut, sans trop de frais, employer la chaleur pour cette dernière opération. Le sel ainsi obtenu est très-pur.

2° Sources salées. — Il existe en Allemagne un très-grand nombre de

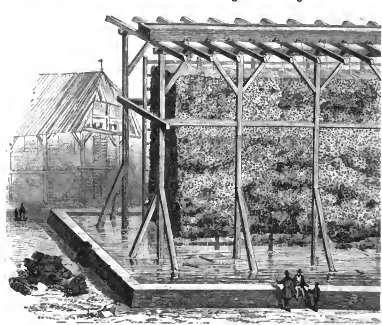


Fig. 163. — Bâtiments de graduation.

sources salées dont les eaux renferment en général trop peu de sel pour qu'on puisse immédiatement les évaporer avec avantage au moyen de la chaleur. On les soumet alors à une évaporation spontanée en les faisant

tomber sur des fagots d'épines disposés en forme de murailles très-hautes, placées sous des hangars (*fig.* 163) ouverts de tous côtés et connus sous le nom de *bâtiments de graduation.*

Ces murailles, qui ont de 400 à 500 mètres de longueur, sur une largeur de 2 à 3 mètres et une hauteur de 15 mètres, sont exposées perpendiculairement au vent dominant de la contrée; elles portent à leur partie supérieure un canal d'où l'eau s'écoule par un grand nombre de rigoles; cette eau se divise en traversant les fagots, et présente ainsi une très-grande surface à l'évaporation. Elle arrive déjà plus concentrée dans le réservoir inférieur, d'où on l'élève de nouveau dans les bassins supérieurs pour la faire repasser une seconde, puis une troisième fois sur les fagots, jusqu'à ce qu'elle marque 25° Baumé. — Les eaux ainsi évaporées contiennent outre le sel marin, du sulfate de chaux, du sulfate de soude et du chlorure de magnésium.

Schlotage. — Dès qu'on commence à les concentrer davantage à l'aide de la chaleur, elles donnent un précipité de sulfate double de chaux et de soude appelé *schlot*, qu'on enlève avec des râteaux.

Salinage. — Quand la concentration devient suffisante, le sel marin se dépose à son tour; on le retire au fur et à mesure, et on le fait égoutter dans des trémies, pour le porter ensuite aux séchoirs.

Les eaux mères retiennent encore beaucoup de chlorure de sodium mêlé de chlorure de magnésium. — En précipitant la magnésie par la chaux, on aurait pu obtenir une plus grande quantité de sel pur.

3° Marais salants. — L'eau de mer contient en moyenne :

Chlorure de sodium.	2,60
— de potassium.	0,06
— de magnésium..	0,35
Sulfate de magnésie.	0,60
— de chaux..	0,01
Carbonate de magnésie et de chaux. . . .	0,02
Eau.	96,36
	100,00

Pour extraire le chlorure de sodium de cette eau, on la fait arriver, soit par une pente convenable, soit en profitant des marées, dans un grand réservoir où se déposent les matières étrangères tenues en suspension; l'eau se répand ensuite dans une série de bassins peu profonds et rendus imperméables par une couche d'argile. Ces bassins sont divisés en une série de compartiments qui communiquent entre eux, et dans lesquels l'évaporation se fait rapidement.

L'eau abandonne dans les premiers bassins du sulfate et du carbonate de chaux; elle se rend ensuite dans un réservoir d'où on l'extrait à

l'aide de pompes pour la porter dans d'autres bassins où elle se concentre, pour cristalliser enfin dans les derniers compartiments, appelés *tables salantes*.

Le sel est réuni en pyramides quadrangulaires pour qu'il puisse s'égoutter; le chlorure de magnésium déliquescent est peu à peu entraîné, le sel qui reste est assez pur pour être livré au commerce.

391. **Eaux mères des marais salants. — Procédé Balard.** — On rejetait autrefois les eaux mères des marais salants lorsqu'elles commençaient à déposer du sulfate de magnésie avec le sel marin; on perdait de cette façon une grande quantité de sel marin ainsi que tout l'acide sulfurique et les sels de potasse contenus dans ces eaux mères. M. Balard a réussi à rendre pratiques des procédés, qui, successivement perfectionnés, permettent aujourd'hui d'extraire tout l'acide sulfurique des eaux mères à l'état de sulfate de soude, et toute la potasse à l'état de chlorure de potassium. Nous indiquerons rapidement la marche de cette nouvelle exploitation.

Les eaux de la mer, évaporées sur le sol jusqu'à 28° Baumé, ont déposé les quatre cinquièmes du sel marin qu'elles contenaient; on les amène alors dans de grands réservoirs profonds, d'où on les prend au fur et à mesure pour les refroidir à — 18°, à l'aide d'appareils réfrigérants analogues à l'appareil à glace de M. Carré. A cette température, presque tout l'acide sulfurique des eaux se dépose à l'état du sulfate de soude qu'on égoutte et qu'on sèche.

Au sortir du réfrigérant, l'eau mère est amenée à l'ébullition dans des chaudières où elle donne du sel marin très-fin. On la fait couler ensuite sur des surfaces rendues imperméables, et sur lesquelles elle abandonne, en se refroidissant, la totalité de sa potasse sous forme de chlorure double de potassium et de magnésium qui, lavé avec moitié de son poids d'eau froide, laisse le chlorure de potassium presque pur.

Les eaux mères qui ont ainsi déposé leur potasse peuvent être rejetées.

392. **Caractères des sels de potasse et de soude.** — Les sels de potasse en dissolution concentrée, donnent avec l'acide tartrique ou le sulfate d'alumine, des précipités cristallins de bitartrate de potasse ou d'alun. Ils donnent avec le bichlorure de platine un précipité jaune de chlorure double de platine et de potassium.

Les sels de soude ne précipitent par aucun des réactifs que nous venons d'indiquer, mais ils donnent avec l'antimoniate de potasse un précipité d'antimoniate de soude.

SELS AMMONIACAUX

393. **Constitution des sels ammoniacaux.** — Le gaz ammoniac forme avec les hydracides et avec les oxacides hydratés des sels qui sont isomorphes des composés correspondants formés par la potasse.

La constitution de ces corps paraît cependant très-différente de celle des sels de potasse. — Ainsi, tandis que la potasse, en s'unissant à l'acide chlorhydrique, donne naissance à un chlorure avec production d'eau, le gaz ammoniac s'unit à cet acide sans élimination d'aucune substance :

$$KO + HCl = KCl + HO$$
$$AzH^3 + HCl = AzH^3, HCl,$$

tandis que la potasse s'unit à l'acide sulfurique hydraté en donnant un sulfate et de l'eau, le gaz ammoniac s'unit à l'acide sans lui faire rien perdre.

$$KO + SO^3, HO = KO,SO^3 + HO$$
$$AzH^3 + SO^3, HO = AzH^3 HO, SO^3.$$

L'isomorphisme de ces corps, l'analogie complète de leurs propriétés chimiques, rendaient trop frappante cette exception à la loi d'analogie de composition des corps isomorphes pour qu'on n'ait pas cherché à s'en rendre compte. Cette anomalie disparaît complètement si on admet avec Ampère que dans les sels ammoniacaux, il entre non pas de l'ammoniac AzH^3, mais le composé AzH^4, jouant le rôle de métal semblable au potassium. Le chlorhydrate d'ammoniaque, $Az H^3, HCl$, devient alors du chlorure d'ammonium, $Az H^4 Cl$, dont l'isomorphisme avec le chlorure de potassium n'a plus rien que de très-naturel. Le sulfate d'ammoniaque, $Az H^3, HO, SO^3$ devient du sulfate d'oxyde d'ammonium, $Az H^4 O, SO^3$, analogue au sulfate d'oxyde de potassium.

L'ammonium n'a pas encore été isolé, mais on a préparé son amalgame. En mettant une dissolution de chlorure d'ammonium en présence d'un amalgame de sodium, on voit le mercure gonfler rapidement en prenant la consistance du beurre. Il s'est formé du chlorure de sodium et de l'amalgame d'ammonium. — Cet amalgame, abandonné à lui-même, se décompose peu à peu en hydrogène et ammoniac qui se dégagent.

L'existence d'un *métal* composé n'aurait rien d'extraordinaire, car nous avons vu un autre corps composé, le cyanogène $C^2 Az$, jouer le rôle d'un métalloïde.

M. Chevreul objecte, il est vrai, avec raison, qu'il est difficile d'admettre que l'ammoniaque puisse, pour former un corps aussi instable que l'ammonium, enlever à l'acide chlorhydrique l'hydrogène qui a tant d'affinité pour le chlore.

L'existence de l'ammonium n'est pas admise par tous les chimistes, mais l'hypothèse d'Ampère n'en a pas moins rendu service en simplifiant l'étude des composés ammoniacaux.

394. **Sulfate d'ammoniaque** (AzH^3,HO,SO^3). — Le sulfate d'ammoniaque est un sel incolore, d'une saveur piquante ; il est très-soluble dans l'eau et cristallise en prismes hexagonaux. La chaleur le décompose.

On obtient le sulfate d'ammoniaque :

1° En recueillant dans l'acide sulfurique l'ammoniaque et le carbonate d'ammoniaque qui se dégagent dans la distillation des matières azotées (viandes, cornes, peaux), soit seules, soit mêlées avec de la chaux ;

2° En traitant les urines putréfiées par le plâtre ou sulfate de chaux qui, au contact du carbonate d'ammoniaque, donne du carbonate de chaux et du sulfate d'ammoniaque ;

3° Par le procédé indiqué pour l'épuration du gaz de l'éclairage.

Le sulfate d'ammoniaque sert actuellement à préparer la plus grande partie de l'ammoniaque en dissolution, ainsi que le carbonate et le chlorhydrate d'ammoniaque.

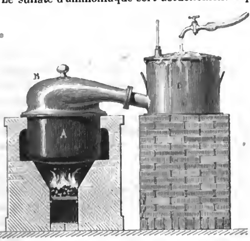


Fig. 164. — Préparation du carbonate d'ammoniaque.

395. **Carbonate d'ammoniaque** $2(AzH^3HO),3CO^2$.— Le carbonate d'ammoniaque du commerce ou *sel volatil d'Angleterre* a une saveur caustique et une odeur ammoniacale très-prononcée. Exposé à l'air, il perd une portion de son ammoniaque, et se change en bicarbonate.

Il prend naissance dans la putréfaction ou la distillation de toutes les matières azotées.

On le prépare en chauffant parties égales de sulfate d'ammoniaque et de craie dans une chaudière en fonte (*fig.* 164) recouverte d'un chapiteau de plomb qui s'adapte à un récipient refroidi ; le carbonate d'ammoniaque se volatilise avec un peu d'ammoniaque et de vapeur d'eau :

$$3(AzH^3HO,SO^3)+3CaO,CO^2=2(AzH^3HO),3CO^2+3CaO.SO^3+AzH^3+HO.$$

396. **Phosphate d'ammoniaque** $2(AzH^3,HO),HOPhO^5$. — Ce

sel est incolore et inodore ; sa décomposition par la chaleur est utilisée pour préparer l'acide métaphosphorique vitreux (PHO^5, HO).

Une étoffe imprégnée de ce phosphate se carbonise sous l'influence de la chaleur sans donner de flamme, grâce à ce que l'acide phosphorique qui résulte de la décomposition du sel, forme sur les fibres un enduit vitreux, qui les empêche de s'enflammer.

On le prépare en faisant réagir le carbonate d'ammoniaque sur le phosphate acide de chaux obtenu par l'action de l'acide sulfurique (111) sur la poudre d'os. Il se forme un précipité insoluble de carbonate de chaux et du phosphate d'ammoniaque qui reste en dissolution.

397. **Chlorhydrate d'ammoniaque** ($Az H^3$, HCl). — Le chlorhydrate d'ammoniaque ou *sel ammoniac* est incolore et sans odeur ; il a une saveur salée, piquante. Il est très-soluble dans l'eau, surtout à chaud, et cristallise en octaèdres groupés en longues aiguilles réunies sous la forme de barbes de plume. Chauffé, il se volatilise sans fondre.

Préparation — 1° On a longtemps retiré le sel ammoniac de l'Égypte, où on l'extrait de la fiente des chameaux qui renferme ce sel tout formé. La fiente desséchée et brûlée donne une fumée épaisse contenant une grande quantité de sel ammoniac qui se condense avec la suie. Cette suie, recueillie et distillée dans de grands ballons de verre, produit le sel ammoniac du commerce.

2° On prépare aujourd'hui le sel ammoniac en chauffant du sulfate d'ammoniaque avec du sel marin. Il se forme du sulfate de soude, et le sel ammoniac se sublime :

$$Az H^3, HO, SO^3 + Na Cl = Na O, SO^3 + Az H^3, HCl.$$

Le sel ammoniac est employé dans les laboratoires pour la préparation du gaz ammoniac. Dans l'industrie, il sert à *décaper* les métaux, dont il transforme les oxydes en chlorures volatils.

398. **Caractères des sels ammoniacaux**. — Les sels ammoniacaux sont isomorphes des sels de potasse. En dissolution, ils donnent avec le bichlorure de platine un précipité, comme les sels de potasse. Chauffés avec un alcali fixe, ils produisent un dégagement de gaz ammoniac reconnaissable à son odeur. Cette réaction est caractéristique.

CHAPITRE V.

Baryum. — Calcium. — Leurs composés usuels. — Baryte. — Chaux. — Carbonate de chaux — Plâtre. — Chaux hydrauliques. — Mortiers.

BARYUM (Ba), Équiv. en poids = 68

CALCIUM (Ca) Équiv. en poids = 20

399. **Propriétés.** — Ces deux métaux ont été obtenus par Davy en décomposant leurs oxydes par la pile. Depuis cette époque, MM. Bunsen et Mathiessen les ont préparés en décomposant le chlorure par une pile de quelques éléments seulement. Enfin, dans ces derniers temps, MM. Liès Bodart et Jadin ont obtenu le calcium en décomposant son iodure par le sodium.

Ces deux métaux sont d'un blanc jaunâtre; leur éclat est celui de l'argent. Ils se conservent bien dans l'air sec, mais s'altèrent rapidement dans l'air humide, parce qu'ils décomposent l'eau à froid. Ils fondent au rouge et s'enflamment.

COMPOSÉS DU BARYUM.

Le baryum forme avec l'oxygène deux composés importants, la baryte Ba O, et le bioxyde de baryum, $Ba\,O^2$.

400. **Baryte.** — La baryte anhydre est une matière d'un blanc grisâtre, d'une saveur très-caustique. — Sa densité est de beaucoup supérieure à celle de toutes les matières terreuses; de là le poids considérable de tous les composés barytiques. — Elle est infusible et fixe aux températures de nos fourneaux.

La baryte a une grande affinité pour l'eau; quelques gouttes de ce liquide projetées sur des morceaux de baryte produisent une élévation de température considérable; une partie de l'eau est vaporisée avec un sifflement aigu. — L'acide sulfurique concentré se combine avec la baryte en dégageant assez de chaleur pour porter la masse à l'incandescence. La baryte anhydre doit être conservée dans des flacons bien bouchés; à l'air humide, elle tombe en poussière en absorbant peu à peu la vapeur d'eau.

La baryte forme avec l'eau un hydrate très-soluble à chaud, et qui par refroidissement cristallise avec 10 équivalents d'eau : $Ba\,O + 10HO$.

Cet hydrate chauffé perd 9 équivalents d'eau, et donne Ba O, HO, indécomposable par la chaleur.

Pour *préparer* la baryte anhydre on calcine au rouge l'azotate de baryte

dans une cornue de porcelaine; l'acide azotique se décompose en oxygène et acide hypoazotique qui se dégagent; la baryte reste dans la cornue sous forme de masse boursouflée et poreuse qu'on retire en brisant la cornue.

401. **Bioxyde de baryum.** — La baryte anhydre, Ba O, chauffée à 400° dans un tube de verre, absorbe de l'oxygène et se transforme en bioxyde BaO^2. — Ce corps conserve l'aspect de la baryte; chauffé au rouge vif, il cède la moitié de son oxygène. Cette propriété a, comme nous l'avons dit (38), été utilisée, par M. Boussingault pour la préparation de l'oxygène.

Le bioxyde de baryum sert encore à la préparation de l'eau oxygénée et de l'oxygène ozonisé (42).

402. **Carbonate de baryte.** — Le carbonate de baryte se rencontre à l'état cristallin dans la nature.

Il est insoluble dans l'eau et indécomposable par la chaleur. — Le charbon le décompose au rouge.

Le carbonate de baryte sert principalement à préparer tous les autres composés barytiques. Pour cela on calcine ce corps avec du charbon jusqu'à ce qu'il ne se dégage plus d'oxyde de carbone. On obtient comme résidu un mélange de baryte et de charbon en excès. — L'eau bouillante dissout la baryte et laisse déposer par refroidissement l'hydrate de baryte cristallisé.

Cet hydrate, traité par l'acide chlorhydrique, donne le *chlorure de baryum* employé comme réactif; traité par l'acide azotique, il donne l'*azotate de baryte*, que l'on utilise pour la préparation de la baryte anhydre et pour les feux d'artifice, auxquels il communique une coloration verte.

403. **Sulfate de baryte.** — Le sulfate de baryte existe aussi dans la nature. Il peut servir, à défaut de carbonate, pour préparer les sels de baryte; car en calcinant ce corps avec du charbon, on obtient du sulfure de baryum soluble dans l'eau, et ce sulfure, traité par les acides chlorhydrique ou azotique étendus, donne du chlorure ou de l'azotate.

404. **Caractères des sels de baryte.** — Les sels solubles de baryte produisent avec l'acide sulfurique un précipité blanc insoluble dans les acides. Ils communiquent à la flamme de l'alcool une couleur verte caractéristique.

COMPOSÉS DU CALCIUM.

CHAUX (CaO).

405. **Propriétés.** — La chaux est une matière blanche, amorphe, très-caustique, dont la densité est 2,3. Elle est infusible et indécomposable par la chaleur.

La chaux a une grande affinité pour l'eau ; quand on verse un peu d'eau sur des fragments de chaux anhydre, le liquide est d'abord absorbé, mais bientôt la chaux s'échauffe et réduit en vapeur une partie de l'eau qui avait pénétré dans ses pores ; en même temps elle se gonfle, se fendille et tombe en poussière. La chaleur, dégagée dans cette combinaison, suffit pour élever à 300° la température d'un corps plongé au milieu de la chaux. — Le produit formé est de l'hydrate de chaux, CaO,HO.

Cette chaux hydratée est appelée communément *chaux éteinte*; la chaux anhydre est désignée sous le nom de *chaux vive*. — En délayant la chaux éteinte dans une petite quantité d'eau, on obtient une bouillie blanche, qui, à cause de son aspect, est appelée *lait de chaux*. — Une très-grande quantité d'eau agitée avec de la chaux, puis laissée en repos, donne une dissolution incolore : *l'eau de chaux*.

L'eau de chaux possède une réaction alcaline, et verdit le sirop de violette. — Elle absorbe facilement l'acide carbonique de l'air en donnant un carbonate de chaux insoluble ; aussi doit-on la conserver dans des flacons bien bouchés.

La chaux vive, exposée au contact de l'air *se délite*, c'est-à-dire se réduit peu à peu en poussière, en absorbant de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique, elle est alors transformée en hydrate et carbonate de chaux.

406. **Préparation. — Usages.**—La chaux s'obtient d'ordinaire par la calcination du carbonate de chaux (411); elle est employée dans les laboratoires pour la préparation de la potasse, de la soude et de l'ammoniaque; ses applications les plus importantes sont étudiées, ainsi que son mode de préparation, aux §§ 411-415.

CARBONATE DE CHAUX (CaO,CO^2)

407. **Propriétés.**— Le carbonate de chaux est un corps solide, blanc, insoluble dans l'eau pure, mais soluble dans l'eau chargée d'acide carbonique. — Toutes les eaux courantes contiennent un peu de carbonate de chaux dissous grâce à la présence de l'acide carbonique.

Certaines sources, très-riches en acide carbonique, tiennent en dissolution une si grande quantité de carbonate de chaux, qu'en arrivant au contact de l'air et perdant de l'acide carbonique, elles laissent déposer une partie de ce carbonate, qui *incruste* alors tous les corps sur lesquels il tombe. Des objets exposés pendant quelques jours à l'action de ces eaux, se trouvent complétement recouverts d'une couche calcaire. — Ces sources sont appelées *pétrifiantes;* telle est la source de Saint-Allyre, près Clermont, et celle de Saint-Philippe, en Toscane.

Un phénoméne semblable donne naissance aux *stalactites* et aux *stalagmites* que l'on rencontre dans certaines grottes. Les eaux, après

s'être infiltrées lentement à travers les terrains placés au-dessus de la grotte, viennent y suinter goutte à goutte; mais comme ces gouttes restent pendant un certain temps suspendues à la voûte, elles déposent une partie de leur carbonate de chaux, qui forme un anneau. De nouvelles gouttes arrivant successivement, prolongent cet anneau et en font un cylindre creux à l'intérieur, pendant que d'autres gouttes, s'évaporant à la surface extérieure de ce cylindre, augmentent son diamètre et constituent peu à peu le cône renversé que l'on appelle ***stalactite*** (***fig.*** 165). L'eau qui tombe sur le sol dépose en s'évaporant le reste de son carbonate de chaux et forme un autre cône droit appelé ***stalagmite***. Ces deux cônes peuvent, avec le temps, se rejoindre et constituer une colonne.

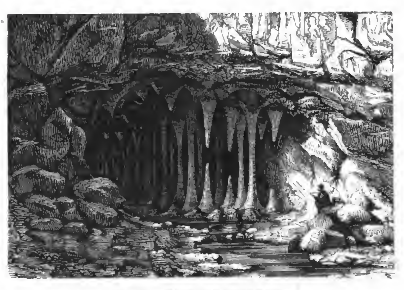


Fig. 165. — Stalactites et stalagmites.

C'est encore au carbonate de chaux que sont dues les ***incrustations*** que présentent souvent les tuyaux de conduite de certaines eaux et les chaudières des machines à vapeur.

Soumis à l'action de la chaleur à l'air libre, le carbonate de chaux se décompose en chaux vive et en acide carbonique. Mais quand la calcination se fait dans un canon de fusil, hermétiquement fermé (*expérience de Hales*), de manière à empêcher le dégagement de l'acide carbonique, le carbonate de chaux fond sans se décomposer et prend en se refroidissant la texture cristalline du marbre.

408. **État naturel.** — Le carbonate de chaux est le composé le plus répandu dans la nature; il se présente sous des aspects très-variés: tantôt

cristallisé, comme dans le spath d'Islande et l'arragonite; tantôt amorphe, comme dans la craie et les différents calcaires.

A l'état cristallin, il peut affecter deux formes complétement incompatibles, le *rhomboèdre* et le *prisme droit à base rectangle;* c'est le premier cas de dimorphisme qui ait été constaté.

Le carbonate de chaux *rhomboédrique* est appelé *spath d'Islande;* il est incolore et parfaitement transparent; des facettes de modification peuvent lui donner toutes les formes du prisme à base hexagonale, mais un clivage toujours facile, suivant trois directions constantes, ramène à la forme type.

Le carbonate de chaux *prismatique* est connu sous le nom *d'arragonite;* il est compacte et d'un blanc laiteux. Sa densité est 2,9; celle du spath d'Islande est 2,7. L'arragonite, chauffée au-dessous du rouge, se désagrége et se transforme en un très-grand nombre de petits rhomboèdres.

On peut reproduire artificiellement le carbonate de chaux sous l'une ou l'autre forme, à volonté: les sels solubles de chaux précipités à froid par un carbonate alcalin donnent des rhomboèdres; précipités à la température de 100°, ils donnent des prismes droits à base rectangle.

Les MARBRES sont des variétés de carbonate de chaux à texture cristalline et généralement colorées par des matières étrangères. Ils paraissent être le résultat de la modification moléculaire des calcaires amorphes sous l'influence d'une température élevée, comme dans l'expérience de Hales, que nous avons citée.

L'ALBATRE CALCAIRE est un carbonate translucide et à structure cristalline. On le taille de manière à en faire des coupes et des vases d'ornement. On trouve de belles carrières d'albâtre prés de Grenade en Espagne, à Trapani en Sicile, etc.

Les CALCAIRES forment la plus grande partie des terrains de sédiment, ils sont constitués par les débris de test d'animaux qui vivaient au fond des eaux. Partout où on les rencontre, soit à la surface du sol, soit à une petite profondeur, on les emploie comme pierre à bâtir, tel est le calcaire grossier des environs de Paris (Vaugirard, Issy).

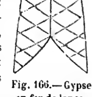
La CRAIE est blanche, à grains très-fins, constitués par les débris d'animaux microscopiques; c'est avec elle qu'on prépare le *blanc d'Espagne* ou *blanc de Meudon* employé pour nettoyer les métaux et le verre.

SULFATE DE CHAUX (CaO,SO^3+2HO).

409. **Propriétés.** — Le sulfate de chaux existe dans la nature à l'état anhydre, CaO,SO (*anhydrite*), mais il est beaucoup plus abondant à l'état hydraté, CaO,SO^3+2HO, et constitue alors ce qu'on appelle le *gypse*, que l'on rencontre en amas considérables dans le voisinage du sel gemme ou

dans les terrains tertiaires des environs de Paris (Pantin, Montmartre).

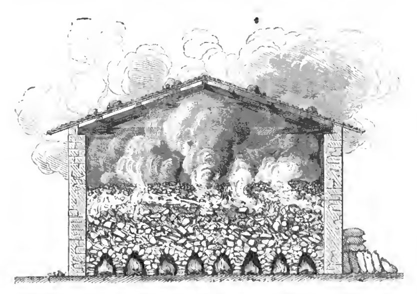
Le gypse se présente quelquefois en cristaux, groupés sous la forme de fer de lances (*fig.* 166) ou de lentilles plus ou moins aplaties. Ces cristaux peuvent être rayés par l'ongle; on peut les cliver en lames minces, incolores, transparentes.


Fig. 166.— Gypse en fer de lance.

Le plus souvent le gypse se présente en masses compactes de couleur blanc jaunâtre, formées par l'enchevêtrement de petits cristaux microscopiques; il est alors appelé communément ***pierre à plâtre***.

Le sulfate de chaux est très-peu soluble dans l'eau : un litre de ce liquide ne dissout guère que 2gr de sulfate. Cette dissolution, appelée ***eau séléniteuse***, est, comme nous l'avons vu (60), impropre à la cuisson des légumes et au savonnage; elle est indigeste. — Les eaux qui alimentent les puits de Paris doivent leurs fâcheuses propriétés au sulfate de chaux qu'elles contiennent.

410. **Plâtre.** — Le gypse chauffé perd son eau de cristallisation vers 130°, il constitue alors le ***plâtre***. Cette matière, réduite en poudre et mélangée (*gâchée*) avec de l'eau, de manière à for-


Fig. 167. — Four à plâtre.

mer une pâte fluide, se ***prend*** en une masse solide, composée de cristaux de sulfate hydraté, enchevêtrés les uns dans les autres. Cette propriété

permet d'employer le plâtre comme mortier dans les constructions et pour le moulage.

Cuisson du plâtre. — On prépare le plâtre en chauffant la pierre à plâtre dans des fours appelés *fours à plâtre* (*fig.* 167), établis à l'entrée des carrières de gypse. On construit avec de grosses pierres à plâtre une série de petites voûtes, sur lesquelles on dispose d'autres pierres, de manière que les plus grosses soient toujours à la partie inférieure; des feux de fagots ou de broussailles allumés sous les voûtes élèvent peu à peu la température; au bout de 10 à 12 heures en moyenne, la calcination est terminée, ce que l'on reconnaît d'ailleurs à l'aspect de la matière. On démolit alors le tas, et on pulvérise tous les morceaux bien cuits.

Ce plâtre, réduit en poudre fine, doit être conservé à l'abri de l'humidité; car s'il a peu à peu absorbé l'humidité, il ne fait plus *prise* avec l'eau : on dit qu'il est *éventé*.

Le plâtre ne doit pas être trop fortement calciné, sans quoi il ne reprend plus que très-lentement son eau de cristallisation.

Stuc. — Le plâtre gâché avec une dissolution de colle forte *fait prise* beaucoup moins vite qu'avec l'eau, mais il acquiert plus de dureté et est susceptible de prendre un beau poli : il constitue alors le *stuc*. En ajoutant à la pâte, des oxydes métalliques, on a des stucs colorés qui imitent le marbre, et avec lesquels on fait des lambris, des colonnes, etc.

Plâtre aluné. — On obtient une matière jouissant des mêmes propriétés que le stuc et résistant mieux aux intempéries de l'air en cuisant un mélange intime de pierre à plâtre et d'alun.

CHLORURE DE CHAUX.

411. **Propriétés, usages.** — On donne dans le commerce le nom de chlorure de chaux à un corps solide, blanc, amorphe et pulvérulent qui répend à l'air une odeur analogue à celle du chlore. C'est un mélange d'*hypochlorite de chaux*, de chlorure de calcium et de chaux hydratée. Traité par l'eau ce corps donne une dissolution d'hypochlorite de chaux et de chlorure de calcium.

Les acides les plus faibles mettent en liberté l'acide hypochloreux qui se décompose au contact des matières organiques et les décolore en agissant par l'affinité de son chlore et de son oxygène naissant pour l'hydrogène.

Le chlorure de chaux est employé dans l'industrie pour le blanchiment des étoffes, pour décolorer les chiffons qui doivent servir à la fabrication du papier. On l'utilise pour désinfecter les fosses d'aisances et pour détruire les miasmes; pour assainir les amphithéâtres de dissection, les hôpitaux, etc. On prépare le chlorure de chaux en faisant arriver un

courant de chlore dans des chambres en maçonnerie où l'on a disposé des tablettes recouvertes de chaux hydratée et pulvérulente. Le produit ainsi obtenu est renfermé dans des tonneaux et livré au commerce.

CHAUX ORDINAIRES. — CHAUX HYDRAULIQUES. — MORTIERS.

412. **Cuisson de la chaux.** — La chaux se prépare en décomposant par la chaleur le carbonate de chaux naturel.

Les *fours à chaux* les plus simples ont la forme d'une cuve ovoïde (*fig.* 168), dont les parois sont formées de briques réfractaires. Ils ont 3 à 4 mètres de hauteur. Pour charger le four, on commence par établir une voûte avec de grosses pierres calcaires, puis on achève de remplir la cuve avec des morceaux de moins en moins gros, de manière à ce que les gaz puissent toujours passer librement. On allume ensuite sous la voûte un feu de broussailles ou de tourbe, et on élève la température jusqu'au rouge. La chaleur décompose peu à peu le carbonate ; cette décomposition est facilitée par le dégagement des gaz du foyer et de la vapeur d'eau, provenant des pierres que l'on a eu soin d'employer pendant qu'elles contenaient encore leur *humidité de carrière*. Quand la cuisson est achevée, on retire la chaux par des ouvertures placées à la partie inférieure du four.

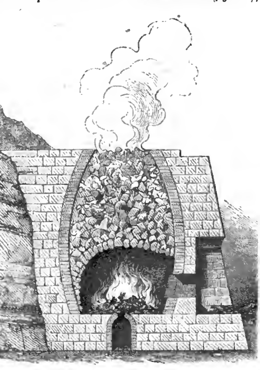


Fig. 168. — Four à chaux.

Ces fours *intermittents* sont aujourd'hui remplacés avantageusement par des fours à calcination continue ou *fours coulants* (*fig.* 169). Ces fours sont formés de deux cônes réunis à leur base, ils ont 8 à 10 mètres de hau-

teur; la chaleur est fournie par un foyer latéral, où l'on peut brûler de la houille, du bois ou de la tourbe; du côté opposé au foyer, une large ouverture sert au défournement de la chaux. Après avoir formé une voûte avec de gros morceaux de calcaire, on remplit le four avec des fragments moindres, puis on commence par faire du feu sous la voûte, afin de cuire tout le calcaire jusqu'à la hauteur du foyer; la chaleur fournie par ce dernier est la seule employée à partir de ce moment. Toutes les douze heures, on retire les pierres qui se trouvent au bas du foyer, et on en introduit de nouvelles par la partie supérieure.

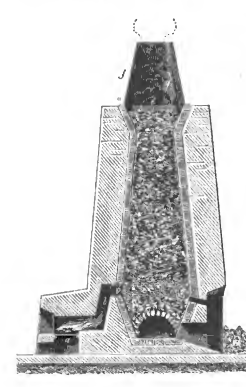


Fig. 169. — Four coulant.

413. Propriétés des chaux. — Les propriétés des chaux dépendent de la composition des calcaires qui ont servi à les préparer. On les distingue en *chaux ordinaires* ou *aériennes*, *chaux hydrauliques* et *ciments*.

Chaux aériennes. — On appelle chaux aériennes, celles que l'on emploie dans les constructions ordinaires, par opposition aux chaux qui doivent être employées dans les constructions hydrauliques. Elles se divisent en *chaux grasses* et *chaux maigres*.

La *chaux grasse* provient de la calcination de calcaires purs. Elle est blanche; en s'éteignant, elle produit un grand dégagement de chaleur et augmente beaucoup de volume; on dit qu'elle *foissonne*, elle est douce et onctueuse au toucher, elle forme avec l'eau une pâte liante et grasse.

La *chaux maigre* provient de calcaires impurs, contenant un peu d'argile, de la magnésie et de l'oxyde de fer. Elle est grise; en s'éteignant elle dégage peu de chaleur, et augmente très-peu de volume; elle forme avec l'eau une pâte courte et peu liante.

Chaux hydrauliques. — On appelle chaux hydrauliques, des chaux qui font

prise sous l'eau, c'est-à-dire se solidifient au bout de quelques jours, et acquièrent peu à peu une très-grande dureté.

Ces chaux résultent de la calcination d'un calcaire qui contient de 10 à 25 pour 100 d'argile.

Ciment. — On appelle ciment une chaux hydraulique, qui, mélangée à l'eau, se solidifie en quelques instants, soit à l'air, soit sous l'eau. Le ciment peut être *gâché* et appliqué comme le plâtre.

Le ciment s'obtient par la calcination des calcaires, qui contiennent de 30 à 60 pour 100 d'argile. — On peut faire des mélanges de calcaire et d'argile, qui par la cuisson produisent de bons ciments artificiels.

Le *ciment romain* provient de calcaires qui existent en grande quantité à Boulogne-sur-Mer et à Vassy, dans la Haute-Marne. Il acquiert en se solidifiant une consistance qui est supérieure à celle des ciments artificiels.

414. **Mortiers.** — On appelle mortiers des substances destinées à unir entre eux les matériaux de construction; ils durcissent avec le temps et contractent une forte adhérence pour les pierres avec lesquelles ils sont en contact. On distingue les *mortiers ordinaires* et les *mortiers hydrauliques.*

Le mortier ordinaire est un mélange de chaux éteinte et de sable; il durcit lentement au contact de l'air; il sert à souder les pierres de nos maisons.

Le mortier hydraulique durcit sous l'eau; il est constamment employé dans la construction des canaux, des ponts, etc. Il est formé soit par le mélange de chaux hydraulique et de sable, soit par le mélange de chaux grasse avec des matières argileuses *cuites*, telles que tuiles, poteries, briques pilées ou roches volcaniques, comme les *pouzzolanes*. C'est de cette dernière roche que se servaient les Romains pour former les ciments qui ont résisté pendant des siècles.

415. **Théorie de la solidification des chaux et des mortiers.** — Les *mortiers aériens* acquièrent peu à peu une très-grande dureté, parce que l'acide carbonique de l'air transforme lentement leur chaux en carbonate insoluble qui contracte une grande adhérence pour les grains de sable, dont le rôle est ici purement physique. — La chaux employée seule ne peut servir à réunir les pierres d'un édifice, parce qu'en se solidifiant elle subit un retrait qui laisse un vide entre ses différentes parties. Le sable fait disparaître cet inconvénient et détermine une adhérence parfaite entre le mortier et les matériaux qu'il sert à réunir. Comme cette transformation ne s'effectue que dans les parties où l'air peut avoir accès, il est important que la dessication ne se fasse que très-lentement, afin que l'acide carbonique puisse agir à une plus grande profondeur et donner par suite une plus grande adhérence aux matériaux.

La solidification de la *chaux* et des *mortiers hydrauliques* est due à une cause toute différente, ainsi que l'a reconnu l'ingénieur Vicat, dont les travaux ont permis de reproduire à volonté des chaux et des mortiers remplissant les conditions nécessaires par des constructions déterminées.

L'argile très-divisée qui existe dans les chaux et les mortiers hydrauliques a été privée d'eau pendant la calcination. Au contact de l'eau et de la chaux elle tend non-seulement à s'hydrater, mais à s'emparer de la chaux pour former un silicate double d'alumine et de chaux, ou un silicate de chaux et un aluminate de chaux, composés complétement insolubles, et qui acquièrent une grande dureté.

On comprend d'après cela pourquoi on peut former des chaux hydrauliques en calcinant un mélange intime d'argile et de calcaire (par exemple d'argile de Vanves et de craie de Meudon), ou encore en mêlant intimement de la chaux grasse avec des argiles cuites ou des roches volcaniques bien pulvérisées.

416. **Bétons.** — Le béton est formé par un mélange de matières hydrauliques avec des cailloux et de petites pierres anguleuses. Ce béton, fabriqué sur place et appliqué en couches successives sur un terrain humide, s'y solidifie, et forme un sol imperméable sur lequel on peut établir des fondations. On emploie le béton pour poser les piles des ponts et pour faire de gros blocs de pierres factices employées dans la construction des digues à la mer.

CHAPITRE VI.

Magnésium. — Sulfate de magnésie. — Aluminium. — Alumine. — Aluns. — Argiles. Poteries. — Porcelaines. — Grès. — Faïences. — Verres.

MAGNÉSIUM (Mg).

Équiv. en poids = 12

417. **Propriétés.**— C'est un métal blanc d'argent, qu'on obtient en décomposant le chlorure de magnésium par le sodium. — Il fond vers 500° et distille au-dessus de 1000°.

Chauffé au contact de l'air, il brûle avec une flamme blanche très-éclatante accompagnée d'étincelles bleu indigo. Le produit est de la magnésie, MgO, oxyde infusible.

Le magnésium décompose l'eau au-dessus de 50°; le liquide acquiert une réaction alcaline.

Ce métal existe dans la nature à l'état de carbonate et de silicate dans beaucoup de roches; à l'état de sulfate de magnésie et de chlorure de magnésium dans l'eau de la mer et de plusieurs sources minérales.

418. **Sulfate de magnésie** (MgO,SO^3+7HO). — Le sulfate de magnésie (*sel de Sedlitz, sel d'Epsom*) est incolore et d'une saveur très-amère. Il cristallise à la température ordinaire avec 7 équivalents d'eau. — Chauffé, il perd successivement toute son eau, puis fond au rouge, et se décompose au rouge blanc en laissant de la magnésie.

Le sulfate de magnésie est très-soluble dans l'eau, sa solubilité augmente avec la température.

Une dissolution bouillante de sulfate de magnésie traitée par une dissolution de carbonate neutre de soude donne un précipité gélatineux qui, en se desséchant, laisse une matière blanche, très-légère, connue sous le nom de *magnésie blanche* des pharmaciens; sa composition est représentée par la formule $3MgO,CO^2+MgO,HO$.

Le sulfate de magnésie existe en dissolution dans les eaux minérales d'Epsom en Angleterre, de Sedlitz et de Pullna, en Bohême.

On admet qu'il est dû à la réaction de l'eau chargée de sulfate de chaux sur le carbonate de magnésie. On justifie cette explication en faisant filtrer lentement et à plusieurs reprises une dissolution saturée de sulfate de chaux sur une couche épaisse de carbonate de magnésie; il se forme du carbonate de chaux insoluble et il passe une dissolution de sulfate de magnésie.

On peut obtenir le sulfate de magnésie en traitant par l'acide sulfurique le carbonate double de chaux et de magnésie (*dolomie*) que l'on trouve dans la nature.

ALUMINIUM (Al).

Équiv. en poids = 14.

419. **Historique**. — L'alumine résiste à l'action de la pile. Aussi Davy avait-il vainement essayé d'en extraire un métal. C'est en 1827 que, par l'action du potassium sur le chlorure d'aluminium, M. Wolher obtint un nouveau métal qu'on appela *aluminium*. A l'état de poussière et souillé de matières étrangères, l'aluminium parut décomposer l'eau bouillante, et fut rangé parmi les métaux de la seconde section. Ses véritables propriétés ne sont connues que depuis les belles recherches de M. H. Sainte-Claire Deville (1854).

420. **Propriétés**. — L'aluminium est un métal blanc légèrement bleuâtre, il fond vers 700°. Sa densité est 2,55; par suite, il est à volume égal quatre fois plus léger que l'argent; il est très-sonore. L'aluminium est très-malléable et très-ductile: on peut l'obtenir en fils fins ou en feuilles minces, comme l'or ou l'argent; il est bon conducteur de la chaleur et de l'électricité.

L'aluminium est inaltérable à l'air, même aux températures les plus

élevées. Il ne décompose pas l'eau, même au rouge, quand il est pur. Les acides sulfurique et azotique sont sans action sur lui à la température ordinaire; ils l'attaquent à chaud. L'acide chlorhydrique et les dissolutions alcalines dissolvent l'aluminium à froid.

L'ensemble de ces propriétés l'éloignent des métaux de la seconde section; quelques-uns de ses caractères semblent le rapprocher du fer, mais le plus grand nombre en font un métal intermédiaire entre les métaux usuels et les métaux nobles.

421. **Préparation.** — Pour obtenir l'aluminium, on fait agir le sodium sur du chlorure double d'aluminium et de sodium. Ce chlorure double d'aluminium et de sodium se prépare en faisant passer un courant de chlore sec sur un mélange d'alumine, de charbon et de chlorure de sodium contenus dans une cornue en grès. Il se produit de l'oxyde de carbone et du chlorure double d'aluminium et de sodium qui se volatilise au rouge et va couler comme de l'huile dans un récipient où il se prend en masse compacte. Pour réduire ce chlorure double, on le mélange avec du sodium en fragments et on projette le tout dans un four à réverbère chauffé au rouge blanc. Il se produit une vive réaction et la matière entre en fusion. A la fin de l'opération, on ouvre un trou de coulée par lequel s'échappe toute la masse fluide, qu'on reçoit dans des caisses en tôle. En concassant cette masse, on en retire facilement l'aluminium. — Le métal est ensuite refondu et coulé en lingots.

On emploie quelquefois, au lieu du chlorure double, un fluorure naturel d'aluminium et de sodium très-abondant au Groënland et connu sous le nom de *cryolithe*.

422. **Usages.** — L'aluminium est employé dans un grand nombre d'industries où son inaltérabilité lui permet de rendre des services importants. Sa légèreté en fait le métal par excellence pour les lunettes, les télescopes, etc.

La bijouterie l'utilise pour la confection d'un grand nombre d'objets d'ornement où il remplace avantageusement l'argent.

ALUMINE (Al^2O^3).

423. **Propriétés.**— L'alumine calcinée, obtenue en chauffant au rouge l'alun ammoniacal, est une matière blanche, pulvérulente, sans odeur ni saveur, et ne fondant qu'au chalumeau à gaz oxygène et hydrogène. Elle est insoluble dans l'eau et ne se dissout que difficilement dans les acides. L'alumine obtenue en précipitant la dissolution d'un sel d'alumine par l'ammoniaque est dans un état moléculaire différent, elle se présente sous forme de gelée translucide, soluble dans les acides vis-à-vis desquels elle joue le rôle de base, et dans les alcalis avec lesquels elle se conduit comme un acide; c'est le type *des oxydes indifférents*.

L'alumine en gelée se combine facilement avec les matières colorantes et forme avec elles des composés insolubles, connus en teinture sous le nom de *laques*.

424. **État naturel**. — L'alumine existe dans la nature à l'état cristallin, sous forme de *rhomboèdres*. Elle constitue alors des pierres précieuses auxquelles on donne différents noms : on l'appelle corindon quand elle est pure et incolore; rubis quand elle est colorée en rouge ; topaze orientale quand elle est colorée en jaune; saphir oriental quand sa teinte est bleue.

L'émeri est de l'alumine souillée d'oxyde de fer, qu'on emploie à cause de sa grande dureté pour polir les corps durs, comme les glaces et l'acier.

L'alumine est la base de toutes les argiles, qui ne sont que des silicates d'alumine hydratés et mélangés de matières étrangères.

ALUN $(KO, SO^3 + Al^2O^3, 3SO^3 + 24HO)$.

425. **Aluns en général**. — L'alun ordinaire est un sulfate double d'alumine et de potasse; il cristallise en octaèdres réguliers (*fig.* 170) ou en cubes et contient 24 équivalents d'eau. L'alun est toujours octaédrique quand il cristallise dans une dissolution acide; il ne donne des cubes qu'en présence d'un excès d'alumine. C'est le type d'un groupe de corps isomorphes qu'on appelle *aluns*, et qui ne diffèrent de l'alun ordinaire qu'en ce que la potasse peut y être remplacée par un des autres alcalis, et l'alumine par un autre sesquioxyde, comme le sesquioxyde de chrôme ou le sesquioxyde de fer. — Tous ces aluns contiennent 24 équivalents d'eau de cristallisation; tous cristallisent en octaèdres; ils peuvent exister en toute proportion dans un même cristal sans en altérer la forme.

426. **Propriétés**. — L'alun est un sel d'une saveur d'abord sucrée, puis astringente. Il est beaucoup plus soluble à chaud qu'à froid; aussi peut-il cristalliser soit par refroidissement, soit par évaporation.

L'alun fond dans son eau de cristallisation à 92°. Si on continue à élever la température, il perd peu à peu son eau et devient anhydre au rouge sombre. Pendant cette dessiccation, l'alun se boursoufle et forme une espèce de champignon blanc et spongieux (*fig.* 171) qui s'élève beaucoup au-dessus des bords du creuset. L'alun anhydre ainsi obtenu s'appelle *alun calciné*.

Chauffé à une température encore plus élevée, l'alun se décompose en donnant de l'acide sulfureux et de l'oxygène qui se dégagent ; il reste dans le creuset un mélange d'alumine et de sulfate de potasse.

L'alun calciné avec du charbon très-divisé donne un mélange très-poreux d'alumine, de sulfure de potassium et de charbon qui s'enflamme spontanément à l'air humide (*pyrophore de Homberg*).

427. **Préparation.** — On prépare l'alun dans l'industrie par des procédés qui varient, suivant les produits naturels dont on peut disposer

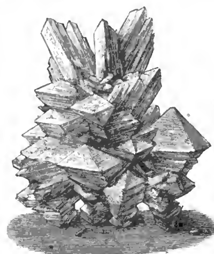






Fig. 170. — Alun octaédrique.

Fig. 171. — Alun calciné.

1° PAR L'ALUNITE. — Dans les environs de Rome et en Hongrie on trouve une pierre naturelle, l'*alunite*, composée d'alun ordinaire, combiné avec de l'alumine hydratée. Pour détruire cette combinaison insoluble et en extraire l'alun, il suffit de calciner modérément l'*alunite* et de la traiter ensuite par l'eau. Cette eau saturée d'alun est séparée par décantation de l'excès d'alumine et abandonnée dans les cristallisoirs, où elle fournit des cristaux *cubiques* légèrement colorés en rose par un peu de sesquioxyde de fer insoluble. C'est l'*alun de Rome*. — Cet alun, qui a pris naissance en présence d'un excès d'alumine, est très-pur; aussi a-t-il été longtemps recherché pour la teinture, où la présence de quantités, même très-petites, de sulfate de fer, détermine une altération des couleurs.

2° PAR LES ARGILES. — En France, en Angleterre et en Allemagne, on prépare l'alun en traitant les argiles par l'acide sulfurique. Les argiles pures formées de silicate d'alumine sont d'abord légèrement calcinées; elles perdent ainsi leur eau et deviennent plus facilement attaquables par les acides. On les mêle ensuite avec de l'acide sulfurique étendu de manière à avoir une densité à peu près égale à 1,5 et on maintient le mélange pendant plusieurs jours à une température d'environ 60° à 80°. La silice se dépose; l'alumine se dissout et forme du sulfate d'alumine, qui, mélangé avec du sulfate de potasse, donne de l'alun *octaédrique*.

3° PAR LES SCHISTES PYRITEUX. — Dans quelques endroits, on utilise des schistes alumineux qui contiennent du bisulfure de fer, FeS^2 (*pyrite*).

Ces schistes, exposés à l'air humide, en absorbent peu à peu l'oxygène et se transforment en sulfate de fer et sulfate d'alumine. Ces sels, dissous et soumis à l'évaporation, donnent du sulfate de fer qui se dépose et du sulfate d'alumine qui reste en dissolution. On ajoutant à ces eaux mères du sulfate de potasse, on obtient de l'alun que l'on purifie par une seconde cristallisation.

428. **Usages.** — L'alun est employé dans la teinture, à cause de la propriété que possède l'alumine de former des laques avec les matières colorantes. Il sert également pour le tannage des cuirs, pour le collage du papier, pour clarifier le suif et pour apprêter les étoffes; il communique au plâtre des propriétés spéciales (410). On l'emploie en médecine comme astringent et comme caustique.

429. **Caractères des sels d'alumine.** — Les sels d'alumine ont une saveur douce et astringente. La potasse et la soude y produisent un précipité soluble dans un excès de réactif, l'ammoniaque, un précipité insoluble dans cet alcali.

L'alumine gélatineuse, calcinée avec une dissolution d'azotate de cobalt, prend une belle coloration bleue.

ARGILES.

430. L'argile pure est un silicate d'alumine hydraté, dont la formule est $Al^2O^3, SiO^3 + 2HO$. C'est une matière blanche, compacte, douce au toucher et difficilement fusible. Elle est plastique, c'est-à-dire qu'elle forme avec l'eau une pâte liante, facile à pétrir et à façonner. Cette pâte en se desséchant se contracte et se fendille; le retrait devient considérable quand on chauffe fortement l'argile. — Les argiles chauffées happent à la langue.

431. **Origine. — État naturel.** — L'argile provient de la décomposition du feldspath, silicate double d'alumine et de potasse, qui, sous l'influence prolongée de l'eau, se dédouble en silicate de potasse soluble, et en silice et silicate d'alumine insolubles.

$$KO,SiO^3 + Al^2O^3,3SiO^3 + 2HO = KO,SiO^3 + 2SiO^3 + Al^2O^3,SiO^3 + 2HO.$$

L'argile pure appelée aussi *kaolin* ou *terre à porcelaine*, se trouve en grande abondance à Saint-Yrieix près Limoges, et en Saxe.

Les argiles ordinaires contiennent, outre la silice et l'alumine, des oxydes de fer ou de manganèse, ainsi que de la chaux et des alcalis; elles sont alors plus ou moins colorées en vert ou en jaune; leur fusibilité est d'autant plus grande, qu'elles contiennent plus de matières étrangères.

On nomme argiles *plastiques* celles qui forment avec l'eau une pâte liante et qui, sous l'influence de la chaleur, acquièrent une grande dureté

sans fondre; telles sont celles de Dreux, de Montereau, etc. Elles servent à la fabrication des poteries réfractaires. — On appelle *smectiques* les argiles qui ne forment avec l'eau qu'une pâte peu liante, et qui fondent à une température élevée; on les emploie pour le dégraissage et le foulage des draps, sous le nom de *terre à foulon*.

Les argiles *figulines* sont des argiles qui doivent leur extrême fusibilité à la chaux et à l'oxyde de fer qu'elles contiennent. Ces argiles forment avec l'eau une pâte peu liante; elles servent à la fabrication des poteries grossières et des terres cuites. On les rencontre à Vanvres et à Vaugirard.

POTERIES.

432. **Composition.** — L'argile forme la base de toutes les poteries, grâce à sa plasticité et à la dureté qu'elle acquiert par la cuisson; mais elle ne peut pas être employée seule, à cause du retrait qu'elle subit en se desséchant; on est obligé d'ajouter à l'argile un ciment, substance *dégraissante*, qui diminuant sa plasticité, diminue en même temps son retrait. On recouvre en général les poteries d'un enduit fusible, espèce de vernis destiné tantôt à rendre la poterie imperméable aux liquides, tantôt à lui donner une surface plus polie.

On divise les poteries en deux groupes : 1° les poteries dont la pâte a subi un commencement de ramollissement pendant la cuisson, et qui sont imperméables aux liquides; telles sont les *porcelaines* et les *grès;* 2° les poteries à pâte poreuse, telles que les *faïences* et les *poteries communes* ou *terres cuites*.

POTERIE DEMI-VITRIFIÉE.

433. **Porcelaines**. — La porcelaine est fabriquée avec du kaolin (argile pure) mêlé avec du sable qui en diminue le retrait et du feldspath appelé *fondant*, qui lui fait éprouver un commencement de fusion et rend la masse translucide.

Ces matières, finement pulvérisées, sont délayées dans l'eau de manière à former une pâte, que l'on malaxe pendant longtemps, afin de la rendre parfaitement homogène.

La pâte ainsi préparée est employée à la confection des divers objets; le travail se fait soit *au tour*, soit par le *moulage* ou le *coulage*. Les pièces façonnées sont ensuite soumises à une première cuisson ou *dégourdi* qui les dessèche et leur donne un certain degré de consistance, tout en leur laissant une grande porosité. C'est alors qu'on les enduit de leur *couverte*, qui doit s'étendre à la surface de la porcelaine demi-vitrifiée et y former une *glaçure*. Ce vernis est formé par la *pegmatite*, mélange

de quartz et de feldspath, qu'on réduit en poudre impalpable, et qu'on délaye dans l'eau de manière à faire une bouillie claire ou ***barbotine***. On plonge dans cette bouillie l'objet à vernir, et on l'en retire aussitôt; l'eau est absorbée par la pâte, et laisse à la surface une couche mince d'une poudre vitrifiable.

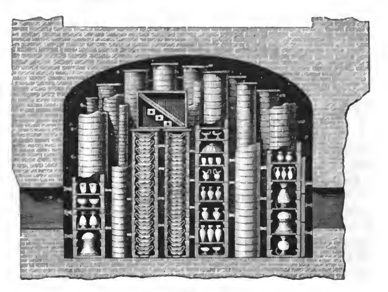


Fig. 172. — Pièces enfournées.

Les pièces doivent alors subir la seconde cuisson. Pour cela on les place dans des *cazettes* ou cylindres en terre réfractaire (*fig.* 172) que l'on empile les uns au-dessus des autres dans le four. Ces cazettes protégent la surface de la porcelaine contre l'action de la fumée et des matières entraînées.

Le four à porcelaine est à trois étages. L'étage supérieur, où la température est la moins élevée, sert à dégourdir les pièces; les deux autres étages, où s'opère la cuisson, sont chauffés par quatre foyers extérieurs ou *alandiers*. Lorsque la cuisson est terminée, on laisse le four se refroidir très-lentement, puis on y pénètre par des ouvertures que l'on avait eu soin de murer avec des briques réfractaires au commencement de l'opération.

434. **Grès cérames**. — Les grès cérames diffèrent de la porcelaine en ce qu'ils ne sont pas translucides; ils sont d'ailleurs comme elle, demi-vitrifiés, durs et imperméables.

Les grès sont formés avec des matériaux un peu moins purs que pour la porcelaine, aussi sont-ils en général légèrement colorés par de l'oxyde de fer. On les cuit à une très-haute température, et pour les vernir, on

projette dans le four, lorsque la chaleur est maximum, une certaine quantité de sel marin humide. Le sel réduit en vapeur se décompose en présence de l'eau au contact des parois argileuses ; il se dégage de l'acide chlorhydrique, et il se forme un silicate de soude qui, combiné au silicate d'alumine, produit un vernis fusible donnant aux grès leur lustre ordinaire.

POTERIE A PATE POREUSE.

435. **Faïences** — Les faïences sont formées avec de l'argile plastique et du quartz réduit en poussière impalpable. Après avoir façonné les pièces, on les soumet à une première cuisson à haute température pour leur donner de la dureté, puis on les recouvre d'un vernis fusible formé de quartz, de carbonate de potasse et d'oxyde de plomb. Ce vernis fond pendant la seconde cuisson, et recouvre la surface d'une couche vitreuse et imperméable de silicate double de potasse et d'oxyde de plomb. Ce vernis transparent ne convient que pour les faïences fines dont la pâte est blanche. Pour les faïences communes, dont la pâte est colorée par de l'oxyde de fer, on emploie un véritable *émail*, vernis rendu opaque par de l'oxyde d'étain.

436. **Poteries communes**. — Les poteries communes employées dans les usages culinaires sont faites avec des argiles très-ferrugineuses mêlées de sable et de marne. Leur couverte est formée par un silicate double d'alumine et de plomb.

437. **Terres cuites.** — Les briques, les tuiles, les fourneaux portatifs, les moules à sucre, les pots à fleur, etc., sont faits avec des argiles marneuses mêlées de sable. La matière, réduite en pâte, est façonnée dans des moules ou sur le tour, puis soumise à la cuisson à une température peu élevée.

438. **Décoration des poteries.** — On décore souvent la porcelaine en recouvrant sa surface de couleurs mêlées à des matières vitreuses assez fusibles.

Les matières colorantes sont généralement des oxydes métalliques, tels que l'oxyde de cobalt pour les bleus, l'oxyde de chrome ou l'oxyde de cuivre pour les verts, l'oxyde d'uranium et le chromate de plomb pour le jaune, le sesquioxyde de fer pour le rouge, et enfin le pourpre de Cassius pour les roses et les violets.— L'or qui sert à dorer la porcelaine s'obtient en précipitant le sesquichlorure d'or par le sulfate de protoxyde de fer, et ajoutant au précipité du borax et de l'oxyde de bismuth.

Toutes ces matières colorantes sont délayées dans l'essence de térébenthine, et appliquées au pinceau. Les pièces sont ensuite chauffées dans des moufles jusqu'à fusion de la matière vitrifiable. Quant à l'or, il n'acquiert du brillant que par le brunissoir.

VERRES.

439. **Propriétés physiques.**—Les verres sont des corps transparents, doués d'un éclat caractéristique appelé *éclat vitreux*. Ils sont durs et cassants. — Chauffés, ils se ramollissent, passent par tous les états de viscosité possibles, et peuvent alors être travaillés comme de la cire.

Les verres sont des silicates doubles résultant de l'union d'un silicate alcalin (de potasse ou de soude) avec un silicate de chaux pour les verres ordinaires, ou un silicate de plomb pour le cristal. Dans les verres communs, comme le verre à bouteilles, il entre un silicate double d'alumine et de fer. Le silicate alcalin seul serait fusible, soluble dans l'eau, et partant, très-altérable; en le mêlant à du silicate de chaux on a un mélange peu fusible, qui n'a plus la solubilité du silicate de potasse, ni la tendance à la cristallisation du silicate de chaux. Le silicate de plomb augmente la fusibilité du verre et lui communique un *pouvoir réfringent* qui le fait rechercher pour beaucoup d'usages. — L'alumine et l'oxyde de fer colorent les verres, les rendent fusibles et facilement altérables.

Trempe. — Le verre chauffé et refroidi brusquement se *trempe* et devient très-cassant. L'extrême fragilité du verre ainsi trempé se démontre à l'aide des *larmes bataviques* (*fig.* 173). Ce sont des larmes de verre terminées par une queue effilée; on les obtient en laissant tomber dans de l'eau froide des gouttes de verre fondu. — Si on vient à casser la pointe de ces larmes, toute la masse se réduit en poussière. Cet effet provient de ce que les molécules superficielles s'étant brusquement refroidies, le retrait du verre n'a pu avoir lieu, et les molécules intérieures sont restées écartées d'une manière anormale. Cet équilibre instable se détruit dès que la résistance extérieure cesse en un point quelconque. — Les *fioles philosophiques* ou *flacons de Bologne* (*fig.* 174) qui sont fort épais et dont le refroidissement a été brusque, se réduisent de même en poussière, quand on laisse tomber dans leur intérieur un corps dur capable de les rayer.

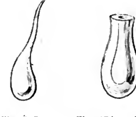


Fig. 173. Larme batavique. Fig. 174. — Fioles philosophiques.

On évite les inconvénients de la trempe en *recuisant* le verre (442).

440. **Propriétés chimiques.** — Les verres maintenus longtemps à une température voisine de celle de leur fusion perdent peu à peu leur transparence, ils se dévitrifient. Cette propriété est surtout très-

développée dans le verre à bouteilles. Il devient rapidement opaque, blanc, très-dur et à peu près infusible; il ressemble alors à de la porcelaine; de là le nom de *porcelaine de Réaumur*, qu'on lui donne souvent.

L'oxygène et l'air secs n'ont pas d'action sur le verre.

Les corps réducteurs, comme le charbon, n'ont d'action que sur les verres à base de plomb.

L'eau froide agit à la longue sur le verre et lui enlève de l'alcali; l'eau bouillante agit plus rapidement, aussi peut-on facilement constater une réaction alcaline dans l'eau que l'on a fait bouillir quelques instants avec du verre pulvérisé. — L'air humide agit à la longue sur le verre, ainsi que le prouve l'altération des vitres dans les vieux bâtiments.

Les *alcalis* agissent lentement : ils dissolvent la silice du verre ordinaire. Les *acides* s'emparent des alcalis du verre et mettent en liberté de la silice gélatineuse. L'acide fluorhydrique attaque les verres en formant du fluorure de silicium et de l'eau.

441. Principales espèces de verre :

1° Verre ordinaire. — C'est un silicate double de soude et de chaux obtenu en fondant ensemble 10 parties de sable fin avec 4 parties de craie blanche et 3 parties de carbonate de soude. Il a une couleur verdâtre quand on le regarde dans sa tranche; on l'emploie comme verre à vitres et comme verre à glaces.

2° Verre de Bohême. — Le verre de Bohême est un silicate double de potasse et de chaux; on l'obtient par le mélange de 12 parties de quartz pur avec 6 parties de carbonate de potasse et 2 parties de chaux vive; il est parfaitement incolore et transparent, léger, peu fusible, et peu altérable. Il sert à fabriquer les objets de gobeleterie tels que verres à boire, carafes, etc.

3° Crown-glass. — Le crown-glass est un verre analogue au verre de Bohême; il est plus riche que ce dernier en potasse et en chaux; il est employé dans la fabrication des instruments d'optique.

4° Verre a bouteilles. — Le verre à bouteilles est fabriqué avec de l'argile, du sable ferrugineux, des cendres et des débris de verres de toute nature; c'est un verre commun, fusible et altérable, même par le bitartrate de potasse que contient le vin. Il est coloré en vert par l'oxyde de fer.

5° Cristal. — C'est un silicate double de potasse et d'oxyde de plomb. On l'obtient en fondant ensemble 30 parties de *sable* pur, 20 parties de *minium* et 10 parties de *carbonate de potasse*. Il est d'une limpidité parfaite. Il est plus dense et plus réfringent que les verres ordinaires ; on ne l'emploie que pour la verrerie de luxe.

6° Flint-glass. — Le flint-glass est une espèce de cristal; il est plus riche en oxyde de plomb. On le prépare en fondant 10 parties de sable pur avec 10 parties de minium et 3 parties de carbonate de potasse. Il

est employé avec le crown pour produire des lentilles achromatiques.

7° Strass. — Le strass contient encore plus de plomb que les deux verres précédents; c'est le plus dense et le plus réfringent de tous les verres. Il sert à imiter le diamant et les pierres précieuses.

8° Émail. — L'émail est un cristal rendu opaque par du bioxyde d'étain ou du phosphate de chaux.

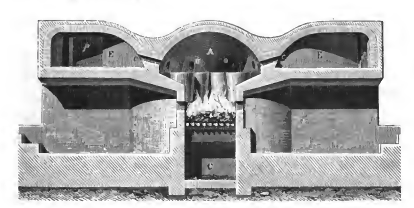


Fig. 175. — Four de verrerie.

442. **Préparation du verre.** — Les matières qui doivent entrer dans la composition du verre, mélangées en général avec des débris de verre semblable, sont soumises à une première calcination appelée *fritte*, qui détermine un commencement de combinaison. La masse frittée est introduite chaude dans des creusets en terre réfractaire (*fig.* 175) chauffés au rouge vif, dans un fourneau circulaire.

Le mélange fond peu à peu, on a soin d'enlever au fur et à mesure les matières étrangères qui viennent à la surface former une écume connue sous le nom de *fiel du verre*. — Si la masse est un peu colorée par de l'oxyde de fer, on réussit à la décolorer par l'addition d'un peu de bioxyde de manganèse (*savon des verriers*). Au bout de 5 à 6 heures l'affinage est terminé.

Le verre, une fois affiné, est travaillé par *soufflage* ou par *moulage*, et le plus souvent par les deux procédés à la fois. L'objet, une fois fabriqué, est soumis au *recuit*; c'est-à-dire qu'on le rechauffe au rouge sombre dans un four où il met 12 heures à se refroidir, on évite ainsi le phénomène de la trempe.

La *coloration* des verres s'obtient à l'aide d'oxydes colorants semblables à ceux qu'utilise la peinture sur porcelaine.

CHAPITRE VII.

Zinc. — Oxyde de zinc — Vitriol blanc. — Fer. — Oxyde de fer. — Vitriol vert. — Pyrites. — Cyanure jaune. — Cyanure rouge. — Bleu de Prusse.

—

ZINC (Zn).

Équiv. en poids = 33

Ce métal n'est connu en Europe que depuis le douzième siècle. On l'a appelé d'abord étain de l'Inde. Il était importé d'Orient.

443. **Propriétés physiques**. — Le zinc est un métal blanc bleuâtre, à texture cristalline. Il est cassant à la température ordinaire, mais il devient ductile et malléable entre 100 et 150°. On peut alors le laminer en feuilles minces. Au-dessus de cette température, il redevient cassant; à 200°, il peut être pulvérisé dans un mortier. Le zinc fond vers 410° et bout vers 1000°.

La densité du zinc fondu est 6,86; elle peut s'élever à 7,2 par le martelage.

444. **Propriétés chimiques**. — Le zinc est inaltérable dans l'oxygène et dans l'air sec. Au contact de l'air humide, il se recouvre d'une couche imperméable d'hydrocarbonate de zinc qui préserve de toute altération le reste du métal. — Chauffé à sa température d'ébullition, le zinc s'enflamme et brûle avec une flamme blanche très-éclatante, en donnant de l'oxyde de zinc infusible qui se répand dans l'air en flocons légers semblables à de la laine.

Le zinc *pur* ne décompose l'eau qu'à une température élevée; il ne la décompose pas à froid en présence des acides. Si le zinc ordinaire décompose l'eau à froid en présence de l'acide sulfurique, cela tient à l'existence, dans le zinc du commerce, de métaux étrangers, tels que le plomb, qui sont électro-négatifs par rapport au zinc, et qui déterminent la formation d'une pile.

445. **État naturel**. — Le zinc se trouve dans la nature, à l'état de sulfure (*blende*) ou de carbonate (*calamine*). C'est de ces deux minerais (760) qu'on extrait tout le zinc du commerce.

446. **Usages**. — Le zinc est employé pour la fabrication du laiton. Réduit en feuilles minces, il sert à couvrir les toits, à faire des gouttières, des bassins, des baignoires. Comme il est électro-positif par rapport au fer, on l'utilise pour protéger ce dernier métal, qui, recouvert de zinc par voie galvanique, prend le nom de *fer galvanisé*.

Le zinc ne peut pas être employé pour les ustensiles de cuisine, parce qu'il forme avec les acides des sels vénéneux.

OXYDE DE ZINC (ZnO).

447. **Propriétés**. — L'oxyde de zinc, appelé autrefois *fleur de zinc* ou *pompholix*, ou *lana philosophica*, est un corps blanc, pulvérulent, infusible et fixe.

Le charbon le réduit au rouge blanc en donnant de la vapeur de zinc et de l'oxyde de carbone.

Combiné aux acides, il forme des sels isomorphes des sels de magnésie. — Précipité par la potasse, il se dissout dans un excès de réactif, et joue alors le rôle d'acide vis-à-vis de l'alcali; c'est donc un oxyde *indifférent*.

448. **Préparation**. — **Usages**. — On prépare l'oxyde de zinc par la combustion du zinc au contact de l'air à la température de sa volatilisation. On peut encore l'obtenir par la calcination du carbonate ou de l'azotate de zinc.

L'oxyde de zinc est employé dans la peinture à l'huile; il est alors connu sous le nom de *blanc de zinc*. Il présente sur la *céruse* ou *blanc de plomb* l'avantage de ne pas noircir sous l'influence des émanations sulfureuses, ce qui tient à ce que le sulfure de zinc est blanc, tandis que le sulfure de plomb est noir. De plus, il n'est pas nuisible aux ouvriers qui l'emploient, tandis que la céruse occasionne des coliques dites *coliques de plomb*.

L'oxyde de zinc, délayé dans le chlorure de zinc additionné d'un peu de carbonate de soude, donne un oxychlorure blanc employé dans la peinture du bois et des toiles.

SULFATE DE ZINC ($ZnO, SO^3 + 7HO$).

449. **Propriétés.** — Le sulfate de zinc ou *vitriol blanc* est un sel d'une saveur métallique et désagréable. Il cristallise à la température ordinaire avec 7 équivalents d'eau; ses cristaux sont isomorphes avec ceux du sulfate de magnésie. Chauffé, il fond dans son eau de cristallisation, puis se déshydrate et se décompose enfin au rouge vif, en donnant de l'oxyde de zinc et de l'acide sulfurique mêlé d'un peu d'oxygène et d'acide sulfureux.

450. **Préparation. — Usages.** — Le sulfate de zinc s'obtient dans les laboratoires comme résidu de la préparation de l'hydrogène. — Dans l'industrie, on le prépare par le grillage du sulfure de zinc naturel (*blende*). Le produit de ce grillage est du sulfate de zinc, mêlé d'un peu de sulfate de fer. On calcine le mélange pour décomposer le sulfate de fer en acide sulfureux et sesquioxyde de fer insoluble; il suffit ensuite

de reprendre par l'eau et de faire cristalliser pour avoir du sulfate de zinc pur.

Le sulfate de zinc est employé en teinture et pour l'impression. Il sert en médecine dans les maladies des yeux.

451. **Caractères des sels de zinc.** — Les sels de zinc sont incolores; ils ont une saveur métallique et provoquent des vomissements. Les alcalis en précipitent de l'oxyde hydraté soluble dans un excès de réactif. Les sulfures alcalins donnent dans les sels de zinc un précipité blanc de sulfure de zinc qui est *caractéristique*.

FER (Fe).

Équiv. en poids = 28

452. **Propriétés physiques.** — Le fer est un métal d'un blanc grisâtre, il est ductile et malléable : c'est le plus tenace de tous les corps; sa densité est 7,7.

Le fer fond vers 1500°. Avant de fondre il se ramollit et devient pâteux ; à cet état, il peut prendre toutes les formes sous le marteau, et se souder à lui-même sans l'intermédiaire d'aucun autre métal.

Le fer a une texture grenue qui, par le martelage, devient *fibreuse*. Cette texture *fibreuse* se modifie lentement avec le temps, ou rapidement sous l'influence des vibrations; elle devient alors *cristalline*. En changeant ainsi de structure, le fer perd de sa ténacité. Aussi est-on obligé de changer les essieux des locomotives au bout d'un certain temps, bien que leur aspect extérieur ne soit pas changé.

Le fer est, de tous les corps, celui qui possède au plus haut degré les propriétés magnétiques. Cette propriété diminue rapidement quand la température s'élève; elle devient nulle au rouge.

453. **Propriétés chimiques.** — Le fer peut s'unir directement avec tous les métalloïdes, excepté avec l'azote.

A la température ordinaire, le fer est inaltérable dans l'air sec; dans l'air humide il se transforme en *rouille* (302). On empêche le fer de se rouiller en recouvrant sa surface d'une légère couche de zinc, *fer galvanisé* (446), ou d'une couche épaisse de peinture.

Chauffé au rouge, le fer brûle en se transformant en oxyde magnétique, Fe^3O^4. C'est cet oxyde (*oxyde des battitures*) qui, sous le choc du marteau, se détache du fer incandescent. C'est encore lui qui se forme quand le fer, en poussière impalpable, tel qu'on l'obtient en décomposant le sesquioxyde de fer par l'hydrogène, s'enflamme spontanément au contact de l'air (*fer pyrophorique*) (306) ; ou quand des petites parcelles métalliques violemment arrachées d'une lame de fer par le choc d'un silex brûlent dans l'air en produisant de brillantes étincelles.

Le fer décompose la vapeur d'eau au rouge; il se dégage de l'hydrogène et il se forme encore de l'oxyde magnétique.

Les acides attaquent facilement le fer : l'acide sulfurique étendu réagit à froid, il donne de l'hydrogène et du sulfate de protoxyde de fer. L'acide concentré n'attaque le fer qu'à l'aide de la chaleur; il produit alors de l'acide sulfureux et du sulfate de fer.

L'acide chlorhydrique réagit à froid et donne de l'hydrogène et du chlorure de fer.

On a vu (92) que l'acide azotique monohydraté n'attaque pas le fer, il le rend *passif.* — L'acide azotique ordinaire donne du protoxyde d'azote mêlé de bioxyde et de l'azotate de protoxyde de fer. — L'acide étendu dissout le fer sans dégagement de gaz; il se forme de l'azotate de protoxyde de fer et de l'azotate d'ammoniaque.

454. **État naturel.** — Le fer est très-répandu dans la nature. Les principaux minerais de fer sont ses oxydes et son carbonate. On le trouve encore à l'état de sulfure (pyrite). Il existe à l'état métallique dans certaines pierres météoriques.

455. Fontes et aciers. — Combiné avec de petites quantités de carbone, le fer constitue les fontes et les aciers (Voir à la Métallurgie, 539 et 540).

OXYDES DE FER.

Le fer forme, avec l'oxygène, plusieurs oxydes dont les plus importants sont : le protoxyde de fer, le sesquioxyde et l'oxyde magnétique.

456. **Protoxyde de fer** (FeO). — Le protoxyde de fer est une base énergique. On le prépare très-difficilement anhydre. — On l'obtient à l'état d'hydrate en précipitant par un alcali une dissolution d'un sel de protoxyde de fer. Le précipité gris passe rapidement au vert noirâtre, puis au brun jaunâtre en absorbant l'oxygène de l'air, et se transformant en sesquioxyde hydraté.

457. **Sesquioxyde de fer** (Fe^2O^3). — Il existe en abondance dans la nature, soit anhydre, soit hydraté; c'est le minerai de fer le plus employé. — Cristallisé en rhomboèdres; il constitue le *fer oligiste*, isomorphe de l'alumine. En masses amorphes rouges, il est appelé *sanguine* et *hématite rouge*.

A l'état hydraté, $2Fe^2O^3, 3HO$, il forme des masses brunes ou jaunâtres connues sous les noms d'*hématite brune*, de *limonite* et de *fer oolithique*.

On l'obtient anhydre comme résidu de la préparation de l'acide sulfurique de Saxe (149); il est alors connu sous le nom de *colcothar* ou *rouge d'Angleterre*, et sert à polir les métaux.

On l'obtient hydraté en précipitant par l'ammoniaque une dissolution d'un sel de sesquioxyde de fer. — La rouille est du sesquioxyde de fer hydraté.

458. **Oxyde magnétique** ($Fe^3O^4 = FeO, Fe^2O^3$). — Ce corps appelé aussi *pierre d'aimant* existe en masses considérables dans la nature, et notamment en Suède. C'est un excellent minerai de fer. Il présente l'aspect d'une masse cristalline formée d'octaèdres réguliers. Sa poussière est noire.

Il se produit toutes les fois que le fer s'oxyde à une température élevée.

SULFATE DE PROTOXYDE DE FER ($FeO,SO^3 + 7HO$).

Le protoxyde et le sesquioxyde de fer forment un grand nombre de sels dont nous indiquerons (463) les caractères généraux. Mais le sulfate de protoxyde de fer est le seul qui mérite une attention spéciale.

459. **Propriétés.** — Ce sulfate, appelé communément *vitriol vert* ou *couperose verte*, a une saveur styptique et astringente. Il est très-soluble dans l'eau, surtout à chaud, et cristallise à la température ordinaire, en prismes obliques à base rhombe, de couleur vert émeraude, qui contiennent 7 équivalents d'eau. — Ces cristaux, exposés à l'air humide, absorbent peu à peu de l'oxygène et se recouvrent d'une couche ocreuse de sous-sulfate de sesquioxyde de fer. L'oxygène est encore plus rapidement absorbé quand le sel est en dissolution ; la coloration verte devient bientôt d'un brun jaunâtre.

Grâce à son affinité pour l'oxygène, le sulfate de protoxyde de fer réduit les sels d'or et précipite l'or à l'état pulvérulent.

Chauffé, le sulfate perd 6 équivalents d'eau à 100°, il perd son dernier équivalent d'eau à 300° en devenant blanc ; au rouge, il se décompose en acide sulfureux, acide sulfurique et sesquioxyde de fer (149).

460. **Préparation.** — On prépare le sulfate de protoxyde de fer soit pour l'attaque directe du fer au moyen de l'acide sulfurique étendu, soit par le grillage ou l'altération spontanée des pyrites. Ces sulfures naturels absorbent peu à peu l'oxygène de l'air humide et forment du sulfate de fer qui cristallise. Comme il contient souvent un peu de cuivre et un excès d'acide, on fait chauffer la dissolution avec un peu de limaille de fer ; celle-ci précipite le cuivre et donne, avec l'acide en excès, de l'hydrogène qui ramène à l'état de protoxyde le sesquioxyde formé au contact de l'air.

461. **Usages.** — Le sulfate de fer est employé en teinture pour les couleurs noir ou gris, et pour préparer la cuve à indigo. Il sert à la fabrication du bleu de Prusse, de l'encre, de l'acide de Saxe, du colcothar, etc.

462. **Composés binaires importants du fer.** — Les autres composés les plus importants du fer, sont les suivants :

Bisulfure de fer ou pyrite. (FeS^2). — Corps solide, très-répandu dans la nature, et qu'on utilise pour la préparation du soufre (135), de l'acide sulfurique (149) et du sulfate de fer (450).

Cyanure jaune ($2KCy + FeCy + 3HO$). — Ce corps appelé aussi *prussiate jaune de potasse*, ou *cyanoferrure de potassium*, se prépare en calcinant au rouge sombre des matières azotées (débris de cuir, de cornes, de chair desséchés) avec du carbonate de potasse et de la limaille, ou de l'oxyde de fer. En faisant chauffer cette masse avec de l'eau au contact de l'air et laissant ensuite refroidir la liqueur, on obtient de beaux cristaux d'un jaune clair.

Cyanure rouge ($3KCy + Fe^2Cy^3$). — Le *cyanure rouge*, ou *prussiate rouge de potasse*, ou *cynoferride de potassium*, s'obtient en faisant passer un courant de chlore dans une dissolution de cyanure jaune jusqu'à ce qu'elle ne précipite plus les sels de sesquioxyde de fer.

Bleu de prusse ($3FeCy + Fe^2Cy^3 + 9HO$). — Ce corps d'une couleur bleu foncé est employé en teinture. L'acide oxalique le dissout et produit avec lui une encre bleue.

463. **Caractères des sels de protoxyde de fer.** — Les sels de protoxyde de fer sont verts quand ils sont hydatrés, blancs quands ils sont anhydres. Leurs dissolutions s'oxydent au contact de l'air en donnant un sel basique brun jaunâtre de sesquioxyde qui se précipite.

Les alcalis donnent dans les sels de protoxyde de fer un précipité gris verdâtre qui se transforme en rouille.

Les sulfures alcalins et le sulfhydrate d'ammoniaque donnent un précipité noir de sulfure de fer.

Le cyanure jaune donne un précipité blanc qui bleuit à l'air.

Le cyanure rouge donne un précipité bleu.

464. **Caractères des sels de sesquioxyde de fer.**— Les sels de sesquioxyde sont jaunes ou rouges; leur saveur est styptique et astringente.

Les alcalis donnent dans les sels de sesquioxye de fer un précipité jaune brun d'hydrate de sesquioxyde de fer.

Le cyanure jaune donne un précipité bleu.

Le cyanure rouge ne donne pas de précipité.

La noix de galle donne un précipité noir.

L'acide sulfhydrique ramène les sels de sesquioxyde à l'état de protoxyde en donnant un dépôt de soufre. — Les sulfures alcalins donnent un précipité noir.

CHAPITRE VIII.

Étain. — Oxyde d'étain. — Liqueur de Libavius. — Plomb. — Litharge. — Minium. — Céruse. Cuivre. — Oxyde. — Vitriol bleu. — Mercure. — Oxyde. — Calomel. — Sublimé corrosif.

—

ÉTAIN (Sn).

Équiv. en poids = 59

465. **Propriétés physiques.** — L'étain est un métal blanc à reflet légèrement jaunâtre ; frotté entre les doigts, il acquiert une légère odeur. Sa densité est 7,29.

L'étain est le plus fusible des métaux usuels, il fond à 228°; on peut le fondre sur une feuille de papier placée sur une plaque de tôle légèrement chauffée par sa face inférieure. Ce métal cristallise en se solidifiant ; il n'est pas volatil.

L'étain est flexible; quand on le plie, il fait entendre un cri particulier qui paraît provenir de ruptures produites dans l'intérieur du métal. — Il est malléable, on peut le réduire en feuilles très-minces ; dans cette opération il ne *s'écrouit pas*, c'est-à-dire qu'il reste mou et flexible. Cette propriété lui est commune avec le plomb. Tous les autres métaux s'écrouissent par le martelage ou le laminage. La ténacité de l'étain est très-faible, elle est cependant un peu supérieure à celle du plomb.

466. **Propriétés chimiques.** — L'étain ne s'altère pas sensiblement à l'air, à la température ordinaire, mais quand on le chauffe à environ 200°, on le voit s'oxyder à la surface en donnant un mélange de protoxyde et de bioxyde d'étain. Une température très-élevée le transformerait en bioxyde avec incandescence.

L'étain se combine directement avec presque tous les métalloïdes.

Il décompose l'eau au rouge en donnant de l'hydrogène et du bioxyde d'étain.

L'acide sulfurique n'attaque l'étain que très-lentement.

L'acide chlorhydrique, au contraire, le dissout facilement, surtout à chaud; de l'hydrogène se dégage et il se forme du protochlorure d'étain.

L'acide azotique concentré le convertit en bioxyde d'étain avec dégagement de bioxyde d'azote.

Les dissolutions alcalines concentrées dissolvent l'étain, grâce à l'affinité de ses oxydes pour les bases énergiques.

467. **Usages.** — Nous avons déjà indiqué l'application de l'étain à la production d'un certain nombre d'alliages importants (299).

Nous avons également vu qu'on l'emploie pour protéger le fer (*fer-blanc*). Ce fer-blanc traité par une dissolution très-étendue d'eau régale laisse apparaître les lamelles cristallisées d'étain qui donnent le *moiré métallique*. Son inaltérabilité à l'air et l'innocuité de ses sels quand ils

sont en très-petites quantités, le fait employer pour la confection des plats, des couverts, des mesures pour les boissons. On profite de sa malléabilité pour faire les feuilles minces qui servent à envelopper le chocolat et le thé. Enfin il sert à l'étamage des vases de cuivre et de fer employés pour la cuisine.

OXYDES D'ÉTAIN.

L'étain forme avec l'oxygène deux combinaisons : le protoxyde, SnO, base faible, et le bioxyde SnO^2, qui joue le rôle d'acide.

468. **Protoxyde d'étain** (SnO). — En traitant le protochlorure d'étain par l'ammoniaque ou par un carbonate alcalin, on obtient un hydrate de protoxyde d'étain blanc. Cet hydrate, au contact d'une dissolution bouillante de potasse ou d'ammoniaque, se change en oxyde anhydre dont l'aspect et les propriétés varient avec les circonstances de la préparation.

Chauffé au contact de l'air, l'acide anhydre se transforme en bioxyde blanc avec dégagement de chaleur et de lumière.

469. **Bioxyde d'étain** (SnO^2). — Le bioxyde d'étain est blanc. Ses propriétés chimiques diffèrent suivant son mode de préparation.

1° Préparé par l'action de l'acide azotique sur l'étain, il s'appelle acide *métastannique* et a pour formule $Sn^5O^{10}, 10HO$.

Ce corps, chauffé à 100°, devient $Sn^5O^{10}, 5HO$, acide qui se combinant avec un équivalent de base donne des métastannates dont la formule est

$$MO, 4HO, Sn^5O^{10}.$$

2° Préparé par l'action du carbonate de chaux sur le bichlorure d'étain, il a pour formule SnO^2, HO, et s'appelle acide *stannique*. Les *stannates* ont pour formule MO, SnO^2.

CHLORURES D'ÉTAIN.

Il existe deux chlorures d'étain qui correspondent aux oxydes.

470. **Protochlorure d'étain** (SnCl). — Le protochlorure d'étain s'obtient en dissolvant l'étain dans l'acide chlorhydrique; il cristallise avec 2 équivalents d'eau (SnCl + 2HO).

Mis en présence d'un grand excès d'eau, il donne un précipité blanc d'oxychlorure (SnCl, SnO); la liqueur devient acide.

Ce corps réduit les sels d'or, de mercure et de cuivre; il ramène le sesquioxyde de fer à l'état de protoxyde soluble dans les acides étendus; de là son usage en teinture pour *ronger* la couleur rouille, par exemple.

471. **Bichlorure d'étain**. — Le bichlorure d'étain, ou *liqueur fumante de Libavius*, est un liquide incolore très-mobile, bouillant vers 120°

Sa densité est 2,28. Il répand à l'air des fumées blanches très-épaisses. Versé dans l'eau, il produit un sifflement aigu, en dégageant beaucoup de chaleur. Il forme dans ces conditions un hydrate $SnCl^2 + 5HO$.

Le bichlorure d'étain forme avec les chlorures alcalins des chlorures doubles bien cristallisés. — Il est employé en teinture pour rehausser l'éclat de certaines couleurs. — Le mélange de protochlorure et de bichlorure d'étain en proportion convenable produit dans les sels d'or le précipité connu sous le nom de *pourpre de Cassius*.

On le prépare en faisant passer un courant de chlore sec sur de l'étain légèrement chauffé (*fig.* 176) dans une cornue de verre tubulée et communiquant avec un récipient refroidi.

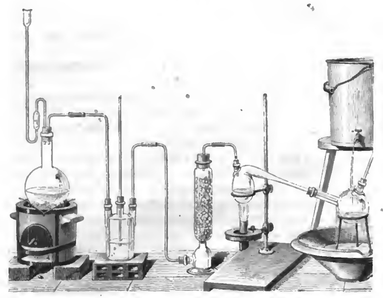


Fig. 176. — Préparation du bichlorure d'étain.

472. **Caractères des sels d'étain.** — La potasse donne dans les sels de protoxyde ou de bioxyde d'étain un précipité blanc soluble dans un excès de réactif; les carbonates, un précipité blanc d'hydrate; le zinc, un précipité d'étain métallique.

L'acide sulfhydrique fournit un moyen de distinguer les sels de protoxyde des sels de bioxyde : il donne un précipité brun marron dans les dissolutions de protoxyde, et un précipité jaune clair dans les dissolutions de bioxyde.

PLOMB (Pb).

Équiv. en poids = 104

473. **Propriétés physiques.** — Le plomb est un métal gris bleuâtre, assez mou pour qu'on puisse le rayer avec l'ongle. Quand on le frotte sur du papier, il laisse une trace grise. Sa densité est 11,35. Il fond vers 335°, et donne au rouge des vapeurs sensibles.

Le plomb est très-malléable. Il ne *s'écrouit* ni par le laminage ni par le martelage. Il est très-peu tenace; aussi ne peut-on que difficilement l'étirer en fils de petit diamètre.

474. **Propriétés chimiques.** — Le plomb est très-brillant quand il vient d'être coupé; mais il se ternit rapidement au contact de l'air par suite de la formation d'une couche de sous-oxyde de plomb Pb^2O. — Chauffé au-dessus de sa température de fusion, il se recouvre d'une pellicule irisée qui, absorbant peu à peu l'oxygène de l'air, se transforme en protoxyde de plomb, PbO, de couleur jaune (*massicot*).

Au contact de l'eau pure *aérée* (eau pluviale ou eau distillée), le plomb absorbe l'oxygène de l'air et forme un oxyde qui, se combinant avec l'eau et l'acide carbonique de l'air, donne une croûte blanche d'hydrate et de carbonate de plomb. C'est une des causes de la détérioration rapide des toitures de plomb. L'eau pluviale qui tombe sur ces toits dissout un peu d'oxyde de plomb et acquiert des propriétés toxiques. — L'eau de rivière ou de source ne possède pas la propriété d'attaquer ce métal; aussi se sert-on, pour la conduite des eaux potables, de tuyaux de plomb qui seraient dangereux pour les eaux de pluie.

Les acides sulfurique et chlorhydrique n'attaquent pas sensiblement le plomb à l'abri du contact de l'air; aussi peut-on concentrer l'acide sulfurique dans des cornues de plomb. La concentration ne peut cependant pas être terminée dans ces cornues, car l'acide sulfurique concentré et bouillant donnerait de l'acide sulfureux et du sulfate de plomb.

475. **État naturel.** — Le plomb se trouve dans la nature à l'état de sulfure (*galène*), de carbonate et de phosphate. C'est de la galène qu'on extrait le plomb du commerce (534).

476. **Usages.** — Le plomb entre dans la composition d'alliages importants (299); il sert à la fabrication du plomb de chasse et des balles de fusil. Réduit en lames, il est employé pour la couverture des toits, pour tapisser les murs des chambres qui servent à la fabrication de l'acide sulfurique et pour garnir l'intérieur des réservoirs où l'on conserve l'eau ordinaire.

Les tuyaux de conduite pour l'eau et le gaz de l'éclairage sont également en plomb. Les jardiniers emploient souvent des fils de plomb pour

fixer les branches à leurs supports. La mollesse de ce métal, la facilité avec laquelle il se plie et prend la forme des surfaces le rend très-propre à ces usages.

OXYDES DE PLOMB.

Le plomb forme avec l'oxygène plusieurs oxydes : un sous-oxyde, Pb^2O ; un protoxyde, PbO ; un bioxyde, PbO^2, et enfin un oxyde salin, Pb^3O^4, résultant de la combinaison du protoxyde et du bioxyde $2PbO, PbO^2$.

477. **Sous-oxyde** (Pb^2O). — Cet oxyde se forme dans l'oxydation du plomb à la température ordinaire ; il est décomposé par les acides en plomb métallique et protoxyde.

478. **Protoxyde de plomb** (PbO). — Le protoxyde de plomb obtenu soit par la calcination d'un sel de plomb (azotate ou carbonate), soit par l'oxydation directe du plomb fondu à une température inférieure au rouge, se présente sous forme de poudre jaune très-lourde, qu'on appelle *massicot*. — Cet oxyde fond au rouge et donne en se refroidissant des écailles cristallines dont la couleur varie du jaune au rouge, suivant la rapidité du refroidissement ; c'est la *litharge*. Ce corps se produit en grand dans la coupellation du plomb argentifère (534).

Le protoxyde de plomb se combine facilement avec les acides pour former des sels ; chauffé dans un creuset de terre, il le perce en s'unissant à la silice et à l'alumine. — L'oxyde de plomb est soluble dans les alcalis ; il est également soluble, quoique en très-petite quantité, dans l'eau *pure*.

Le charbon et l'hydrogène réduisent facilement l'oxyde de plomb.

Usages. — Le *massicot* n'est utilisé que pour la préparation du minium.

La *litharge* sert à préparer les sels de plomb ; elle est la base des emplâtres employés en pharmacie. Elle sert à rendre l'huile de lin plus siccative. On l'utilise pour produire plusieurs belles couleurs jaunes (*jaune minéral, jaune de Turner, jaune de Cassel, jaune de Paris*) qui sont en général des oxychlorures de plomb dont la composition varie avec le procédé de fabrication.

479. **Minium** ($Pb^3O^4 = 2PbO, PbO^2$). — Le minium résulte de l'oxydation du *massicot* à une température peu élevée (300° environ). C'est une poudre lourde et d'un rouge orangé.

Le minium sert à colorer les papiers de tenture et la cire à cacheter ; il est surtout employé dans la fabrication du cristal, verre auquel il communique beaucoup de fusibilité et une grande puissance réfringente. On ne peut pas le remplacer pour cet usage par la litharge, qui serait trop facilement ramenée à l'état métallique par des traces de matières organiques.

On l'emploie encore pour former le vernis des poteries ; mêlé avec du

bioxyde d'étain, il forme l'émail des faïences. Délayé avec un peu d'huile et de la céruse, il donne un mastic rouge employé pour luter les joints dans les pompes, les chaudières à vapeur, etc.

480. **Bioxyde de plomb** (PbO^2). — Ce corps, appelé souvent *oxyde puce* à cause de sa couleur, s'obtient en chauffant le minium avec de l'acide azotique étendu, qui dissout le protoxyde contenu dans le minium et laisse le bioxyde sous forme de poussière brune. Cet oxyde est facilement décomposé par la chaleur ; c'est un oxydant énergique,

Il ne se combine pas avec les acides, mais il se dissout dans les alcalis, avec lesquels il produit des sels cristallisés : de là son nom d'*acide plombique.*

CARBONATE DE PLOMB — CÉRUSE.

481. **Propriétés.** — Le carbonate de plomb du commerce, connu sous les noms de *céruse*, *blanc de plomb*, *blanc d'argent*, est une combinaison de carbonate et d'hydrate. Sa composition peut être exprimée par la formule $PbO, HO + 2(PbO, CO^2)$.

La céruse du commerce est blanche, pulvérulente, insipide, insoluble dans l'eau pure, mais légèrement soluble dans l'eau chargée d'acide carbonique ; elle se dissout avec effervescence dans les acides énergiques.

Soumise à l'action de la chaleur, elle se décompose, perd son eau et son acide carbonique, en laissant de l'oxyde jaune de plomb (*massicot*).

La céruse est employée en peinture ; elle forme avec l'huile une couleur très-blanche qui s'étend facilement au pinceau et *couvre* bien les surfaces. — On s'en sert aussi pour étendre les autres couleurs et leur donner de l'opacité.

La céruse a l'inconvénient de noircir sous l'influence de l'acide sulfhydrique. Elle est d'ailleurs d'un maniement dangereux. — L'absorption de la poussière de céruse occasionne les *coliques de plomb.*

482. **Préparation.** — La céruse se prépare industriellement par deux procédés différents en pratique, mais qui se ressemblent par les réactions auxquelles ils donnent naissance. On les désigne sous les noms de *procédé de Clichy* et de *procédé hollandais.*

1° Procédé de Clichy. — Ce procédé consiste à faire passer un courant d'acide carbonique dans une dissolution d'acétate *tribasique* d'oxyde de plomb ; il se produit de la céruse qui se précipite, et la liqueur ne contient plus que de l'acétate *neutre* de plomb. La céruse, séparée par décantation, n'a besoin que d'être lavée et séchée. Quant à la dissolution, il suffit de la mettre en digestion avec une nouvelle quantité d'oxyde de plomb pour reproduire de l'acétate tribasique. — Le procédé de Clichy a été imaginé par Thénard vers 1801.

L'acide acétique employé résulte de la fermentation des mélasses ; quant

à l'acide carbonique, on le tire actuellement, d'après les conseils de M. Dumas, de la calcination des calcaires destinés à la fabrication de la chaux vive.

2° Procédé hollandais. — Ce procédé est le plus anciennement connu il est encore suivi en Hollande, en Angleterre et dans le nord de la France.

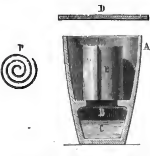
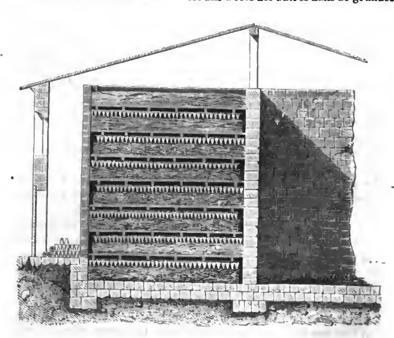


Fig. 177. — Pot à céruse.

Des bandes de plomb P roulées en spirale (*fig.* 177) sont placées dans des pots de grès A, où elles reposent sur un rebord B à quelques centimètres du fond. Sur ce fond, on verse un peu de vinaigre C de qualité inférieure. Le pot est lui-même recouvert d'un disque de plomb D qui le ferme incomplétement.

Les pots ainsi préparés sont placés les uns à côté des autres dans de grandes


Fig. 178. — Fabrication de la céruse (procédé hollandais).

caisses en maçonnerie (*fig.* 178), et on en forme plusieurs rangées que l'on superpose jusqu'à une hauteur de 5 à 6 mètres, en les séparant par des couches épaisses de fumier de cheval ; on a soin de permettre

à l'air une libre circulation dans l'intérieur. — Au bout de six semaines l'opération est terminée ; le plomb se trouve transformé sur une grande épaisseur en carbonate, qu'on détache facilement du métal et qu'on pulvérise.

Voici les phénomènes qui se sont produits : La fermentation du fumier dégage de l'acide carbonique avec élévation de température. Grâce à la chaleur développée, l'acide acétique se vaporise, et les lames de plomb sous la double influence de l'air et de l'acide acétique, se transforment en acétate tribasique de plomb et en hydrate, que l'acide carbonique décompose en acétate neutre et en céruse ; l'opération se continue de proche en proche.

Remarque. La céruse obtenue par ce procédé est moins blanche que la céruse de Clichy, mais elle est plus opaque et *couvre mieux*. Pour obtenir par le procédé Clichy une céruse aussi opaque que par le procédé hollandais, il faut opérer la précipitation dans des liqueurs concentrées, de manière à avoir un seul équivalent d'hydrate pour deux de carbonate, comme dans la formule que nous avons donnée plus haut.

483. **Caractères des sels de plomb.** — La plupart des sels de plomb sont insolubles ; tels sont le sulfate, le phosphate, le carbonate et le chromate. L'azotate et l'acétate sont solubles. — Les sels solubles de plomb, sont tous vénéneux ; ils donnent avec la potasse ou la soude un précipité blanc d'hydrate de protoxyde de plomb soluble dans un excès d'alcali.

L'acide sulfurique et les sulfates solubles produisent un précipité blanc de sulfate de plomb insoluble ; l'acide chlorhydrique et les chlorures un précipité blanc soluble dans l'eau bouillante ; l'iodure de potassium, un précipité jaune d'iodure de plomb.

L'acide sulfhydrique et les sulfures donnent un précipité noir de sulfure de plomb ; le zinc précipite le plomb en lames brillantes et cristallines.

Chauffés sur des charbons ardents, les sels insolubles de plomb donnent du plomb métallique.

CUIVRE (Cu).

Équiv. en poids = 31,5

484. **Propriétés physiques.** — Le cuivre est un métal rouge susceptible d'un très-bel éclat. Frotté, il exhale une odeur particulière et désagréable.

La densité du cuivre fondu est 8,8 ; elle augmente par le laminage et peut s'élever à 8,95. Le cuivre fond vers 1100° et se vaporise, lentement à une température plus élevée en colorant les flammes en vert.

C'est un des métaux les plus ductiles et les plus malléables ; il est après le fer le métal le plus tenace.

485. **Propriétés chimiques.** — Le cuivre ne s'altère ni dans l'oxygène ni dans l'air sec; mais dans l'air humide il se recouvre d'une couche verdâtre d'hydro-carbonate de cuivre, connue sous le nom de *vert-de-gris*. Cette couche, qui se forme également sur les alliages de cuivre et d'étain (bronze), protége le métal contre toute altération ultérieure.

La présence d'un acide (vinaigre, corps gras) susceptible de former avec l'oxyde de cuivre un sel soluble accélère beaucoup l'oxydation; de là le danger de conserver des aliments dans des vases de cuivre : il se forme un sel vénéneux.

L'ammoniaque détermine également l'oxydation du cuivre au contact de l'air, il se forme dans ce cas de l'oxyde de cuivre et de l'azotite d'ammoniaque qui, avec l'excès d'ammoniaque constituent une liqueur bleue susceptible de dissoudre la *cellulose* (571).

Chauffé au contact de l'air, le cuivre s'oxyde en donnant d'abord du sous-oxyde rouge Cu^2O, puis du protoxyde noir, CuO.

L'acide sulfurique concentré attaque le cuivre à chaud; nous avons utilisé cette réaction (145) dans la préparation de l'acide sulfureux.

L'acide azotique l'attaque à froid; c'est par cette réaction que nous avons obtenu le bioxyde d'azote (81).

L'acide chlorhydrique n'attaque le cuivre qu'à chaud et très-lentement; il donne du protochlorure de cuivre, Cu^2 Cl, et de l'hydrogène.

486. **État naturel.** — Le cuivre se rencontre dans la nature à l'état natif, soit en masses très-épaisses, comme au lac Supérieur (Amérique), soit en petits octaèdres réguliers. — Il est beaucoup plus abondant à l'état de sulfure de cuivre Cu^2 S (*Chalkosine*), ou du sulfure double de cuivre et de fer (*pyrite cuivreuse*); on le trouve encore, mais en petite quantité, à l'état d'oxyde ou de carbonate (*malachite, azurite*).

487. **Usages.** — Le cuivre n'est que très-peu employé seul, parce qu'il est très-mou; mais, grâce aux propriétés spéciales de ses alliages (299), c'est le métal le plus important après le fer.

OXYDES DE CUIVRE

Le cuivre forme avec l'oxygène deux oxydes bien connus : un sous-oxyde Cu^2O, et un oxyde, CuO. Il existe encore deux autres oxydes plus oxygénés, mais sans importance.

488. **Sous-oxyde de cuivre**, (Cu^2O).—Cet oxyde, se rencontre dans la nature, soit en masses rouges irrégulières, soit en octaèdres réguliers.

On l'obtient en faisant bouillir de l'acétate de cuivre avec un corps réducteur comme du sucre. Il est surtout employé pour colorer les verres en rouge.

489. **Oxyde de cuivre**, (CuO). — L'oxyde de cuivre est amorphe,

pulvérulent, noir. — On le prépare, soit en chauffant le cuivre au contact de l'air, soit en calcinant l'azotate de cuivre.

L'oxyde de cuivre forme avec l'eau un hydrate bleu, CuO,HO, que l'on obtient en versant un excès de potasse ou de soude dans la dissolution d'un sel de cuivre. — Ce composé bleu se déshydrate au milieu de l'eau bouillante et se change en oxyde anhydre noir.

L'oxyde de cuivre sert à la préparation des sels de cuivre ; traité par l'acide chlorhydrique, il donne le chlorure CuCl. ; dissous de l'acide acétique, il donne l'acétate de cuivre.

SULFATE DE CUIVRE (CuO,SO^3+5HO).

490. **Propriétés**. — Le sulfate de cuivre, *vitriol bleu*, ou *couperose bleue* se trouve dans le commerce, cristallisé en gros prismes obliques à base parallélogramme d'un très-beau bleu. Ces cristaux se dissolvent dans l'eau, et lui donnent une saveur styptique et astringente. Chauffés, ils perdent d'abord quatre équivalents d'eau à la température de 100° environ, puis deviennent anhydres vers 200°. Ils constituent alors une poussière blanche qui redevient bleue au contact de l'eau. — A une température plus élevée, ils se décomposent en oxyde de cuivre, oxygène, acide sulfureux et acide sulfurique anhydre.

491. **Préparation**. — On peut préparer le sulfate de cuivre en chauffant du cuivre avec de l'acide sulfurique concentré comme si l'on voulait préparer de l'acide sulfureux; mais la plus grande partie du sulfate de cuivre du commerce s'obtient en grillant à l'air les sulfures de cuivre naturels. L'oxygène absorbé les transforme en sulfate que l'on dissout dans l'eau et qui cristallise par évaporation.

On utilise encore pour préparer de grandes quantités de sulfate de cuivre les feuilles de cuivre qui ont servi au doublage des vaisseaux, et qui ont été détériorées par l'action corrosive de l'eau de mer. Ces feuilles saupoudrés de soufre en fleur, sont chauffées à l'abri de l'air dans un four, où elles se recouvrent de sous-sulfure de cuivre, Cu^2S ; si on laisse ensuite arriver l'air, ce sulfure de cuivre se transforme en acide sulfureux et sulfate d'oxyde de cuivre. En trempant alors ces feuilles dans l'eau chaude légèrement acidulée, on dissout le sulfate de cuivre qui cristallise par évaporation. On recommence l'opération jusqu'à ce que tout le métal ait disparu.

Usages. — Le vitriol bleu est employé en teinture pour les couleurs noires ou violettes. Il sert en médecine pour cautériser; on l'utilise en agriculture pour *chauler* le blé.

Décomposé par le courant de la pile, il donne du cuivre métallique (*Galvanoplastie*).

Traité à l'ébullition par l'arsénite de soude, il donne un précipité vert

d'arsénite de cuivre, connu en peinture sous le nom de *vert de Scheele*.

492. **Caractères des sels de cuivre.** — Les sels de cuivre sont bleus ou verts; ils ont une saveur métallique très-désagréable, et sont vénéneux.

La potasse et la soude y déterminent un précipité bleu d'hydrate.

L'ammoniaque donne un précipité qui se dissout dans un excès de réactif, en produisant une belle liqueur bleue (*eau céleste*).

Le cyanure jaune donne un précipité brun, même dans les dissolutions très-étendues.

L'acide sulfhydrique et les sulfures précipitent les sels de cuivre en noir.

Enfin, une lame de fer plongée dans une dissolution contenant un sel de cuivre se recouvre immédiatement d'une couche de cuivre métallique.

MERCURE (Hg).

Équiv. en poids = 100

493. **Propriétés physiques.** — Le mercure est blanc et très-brillant (*vif-argent*); c'est le seul métal qui soit liquide à la température ordinaire. Il se solidifie à — 40°, et se présente alors sous l'aspect d'un solide blanc malléable. Il entre en ébullition vers 350°. Sa densité à 0° est 13,596.

Le mercure émet à la température ordinaire des vapeurs à peine sensibles. On peut les mettre en évidence, en exposant dans un flacon une feuille d'or soutenue à une petite distance au-dessus du liquide. Cette feuille blanchit au bout de quelque jours : les vapeurs de mercure l'ont transformée en amalgame.

494. **Propriétés chimiques.** — Le mercure s'altère lentement au contact de l'air à la température ordinaire ; sa surface se recouvre d'une pellicule grise de sous-oxyde de Hg^2O, qui peut se dissoudre partiellement dans le métal, et s'attacher aux parois du verre.

L'oxydation du mercure se fait très-rapidement à la température de 350°. Il se produit dans ces circonstancces de l'oxyde rouge HgO (précipité *per se*). Cette propriété a permis à Lavoisier (67) de découvrir la composition de l'air.

Le *chlore* attaque le mercure même à froid, et forme avec lui un sous-chlorure, Hg^2Cl, si le métal est en excès; il forme un chlorure, HgCl, si le chlore domine.

Le *soufre* chauffé doucement avec du mercure donne un sulfure, HgS, qui se présente d'abord sous forme de poudre noire (*éthiops minéral*), mais qui se sublime en beaux cristaux rouges (*cinabre artificiel*).

L'acide *sulfurique* n'a pas d'action à froid sur le mercure. A chaud et

concentré, il agit en donnant de l'acide sulfureux (145) et du sulfate de mercure. — L'acide chlorhydrique n'agit ni à chaud, ni à froid.

L'acide *azotique*, étendu et froid, donne du bioxyde d'azote et de l'azotate de sous-oxyde de mercure; à chaud, il produit de l'azotate d'oxyde de mercure, en dégageant toujours du bioxyde d'azote.

495. **État naturel.** — Le mercure existe dans la nature à l'état natif, mais c'est surtout à l'état de sulfure (*cinabre*) qu'on le rencontre en grande abondance (532).

Usages. — Le mercure est utilisé pour la construction d'un grand nombre d'appareils de physique ou de chimie : tels que baromètres, manomètres, thermomètres, cuves à mercure, etc. Il est employé dans l'étamage des glaces. C'est surtout à l'extraction de l'or et de l'argent qu'est appliquée la plus grande partie du mercure retiré du cinabre.

OXYDES DE MERCURE.

496. **Sous-oxyde** (Hg^2O). — C'est une poudre noire très-peu stable; sous l'influence de la lumière solaire ou d'une température de 100°, elle se décompose en mercure métallique et en oxyde, HgO.

On obtient le sous-oxyde en précipitant par la potasse l'azotate de sous-oxyde, préparé en dissolvant le mercure dans l'acide azotique étendu et froid.

497. **Oxyde de mercure** (HgO). — Cet oxyde se présente sous la forme d'une poudre jaune amorphe, ou sous la forme d'une poussière cristalline rouge, suivant qu'il a été préparé par voie humide ou par voie sèche. L'oxyde jaune est plus facilement attaqué que l'oxyde rouge. — Le chlore attaque l'oxyde jaune à froid, il n'attaque l'oxyde rouge que sous l'influence de la chaleur.

On prépare l'oxyde jaune en décomposant le chlorure de mercure, HgCl, par la potasse. L'oxyde rouge s'obtient par la calcination ménagée de l'azotate d'oxyde de mercure (HgO,AzO^5).

CHLORURES DE MERCURE.

498. **Sous-chlorure** (Hg^2Cl). — Ce corps appelé, aussi *calomel*, *sublimé doux* ou *mercure doux* est solide, transparent et incolore. Il est volatil et cristallise par sublimation en prismes droits à base carrée. La lumière le décompose lentement.

Le sous-chlorure de mercure est insoluble dans l'eau. Aussi prend-il naissance quand on verse dans un sel de sous-oxyde, de l'acide chlorhydrique, même très-étendu. Mis en présence des chlorures alcalins à une température peu élevée, il se décompose en mercure et en chlorure, HgCl. — Une réaction semblable peut se produire dans l'estomac, grâce

à la présence du sel marin; c'est pourquoi il faut éviter de prendre du calomel peu de temps après avoir absorbé des aliments salés.

On obtient le calomel en chauffant ensemble du sulfate de sous-oxyde de mercure avec du sel marin.

$$Hg^2O,SO^3 + NaCl = Hg^2Cl + NaO,SO^3.$$

Le sous-chlorure volatilisé est reçu dans un grand récipient en même temps qu'un jet de vapeur d'eau qui le divise et détermine sa condensation, sous forme d'une poussière blanche impalpable (*calomel à la vapeur*). Cette poussière doit être lavée jusqu'à ce que l'eau de lavage ne précipite plus par l'acide sulfhydrique.

Le calomel est employé en médecine comme vermifuge et comme purgatif.

499. **Chlorure de mercure** (Hg Cl). — Ce corps, connu sous le nom de *sublimé corrosif*, est solide et transparent. Il se sublime et cristallise en octaèdres droits à base rectangle. Il est soluble dans l'eau.



Fig. 179.
Préparation du sublimé corrosif.

C'est un poison extrêmement violent; il corrode les membranes et détermine très-rapidement la mort.

L'albumine ou blanc d'œuf forme avec le chlorure de mercure un composé complétement insoluble, aussi est-ce le contre-poison le plus efficace du sublimé corrosif. — Ce chlorure forme de même, avec la plupart des matières organiques, végétales ou animales, des composés insolubles et imputrescibles; de là son emploi pour conserver les pièces d'anatomie.

On l'obtient en chauffant du sulfate d'oxyde de mercure avec du sel marin :

$$HgO,SO^3 + NaCl = HgCl + NaO,SO^3.$$

La réaction peut se faire dans une fiole à fond plat (*fig.* 179) chauffée au bain de sable.

Le sublimé corrosif est employé en médecine à très-faible dose ; il sert aussi pour conserver les objets d'histoire naturelle et pour détruire les punaises.

500. **Caractères des sels de mercure.** — Les sels de mercure sont incolores quand ils sont neutres et colorés en jaune quand ils sont basiques. Une lame de zinc ou de cuivre, plongée dans une dissolution de sel de mercure, se couvre d'une tache blanche d'amalgame.

Les sels de *sous-oxyde* donnent avec la potasse et la soude un précipité noir de sous-oxyde de mercure; avec l'acide sulfhydrique et les sulfures, un précipité noir de sous-sulfure; avec l'iodure de potassium, un précipité vert de sous-iodure. — Avec l'acide chlorhydrique et les chlorures, ils produisent du sous-chlorure blanc, insoluble (calomel).

Les sels *d'oxyde* donnent avec la potasse un précipité jaune d'oxyde de mercure; avec l'iodure de potassium, un précipité rouge d'iodure de mercure, soluble dans un excès de réactif.

L'acide sulfhydrique versé lentement produit un précipité blanc qui passe successivement au jaune, au brun et enfin au noir.

Si l'on avait affaire à un mélange de sel de sous-oxyde et d'oxyde de mercure, on pourrait y constater leur présence, en versant d'abord de l'acide chlorhydrique qui produirait avec le sel de sous-oxyde un précipité blanc de sous-chlorure Hg^2Cl, puis de la potasse, qui donnerait un précipité jaune d'oxyde HgO.

CHAPITRE IX.

Argent.—Azotate d'argent — Chlorure.—Essais des alliages d'argent.—Coupellation.— Voie humide. — Or. — Chlorures d'or. — Platine. — Chlorures de platine. — Moyen de reconnaître l'acide d'un sel. — Moyen de reconnaître la base d'un sel.

ARGENT (Ag.).

Équiv. en poids = 108

501. **Propriétés physiques.** — L'argent est le plus blanc des métaux, c'est celui qui, par le poli, acquiert le plus d'éclat. Sa densité est 10,5. Il fond vers 1000°, et se volatilise à une température plus élevée en donnant des vapeurs vertes. — A l'état liquide, il jouit de la propriété de dissoudre 22 fois son volume d'oxygène et de laisser dégager ce gaz au moment où il se solidifie. Ce dégagement brusque détermine souvent la projection d'un peu de métal et la production d'une espèce de champignon à la surface du bouton métallique; on dit alors que l'argent *roche*.

L'argent est très-ductile, très-malléable et assez tenace. Il est bon conducteur de la chaleur et de l'électricité.

502. **Propriétés chimiques.** — L'argent ne s'oxyde à l'air à aucune température; il se combine directement avec la plupart des métalloïdes à une température plus ou moins élevée.

L'acide *azotique* le dissout à froid, même quand il est étendu et donne du bioxyde d'azote avec de l'azotate d'oxyde d'argent.

L'acide *sulfurique* ne l'attaque que lorsqu'il est concentré et bouillant.

L'acide *chlorhydrique* ne l'attaque que superficiellement, parce qu'il se produit un chlorure insoluble qui protége le reste du métal.

L'acide *sulfhydrique* le noircit en formant une couche de sulfure d'argent.

Les *alcalis* ne sont pas attaqués par l'argent, aussi se sert-on toujours de creusets et de bassines d'argent pour la préparation de la potasse (368), et de la soude, ainsi que pour l'attaque des silicates par ces alcalis.

503. **État naturel.** — L'argent existe dans la nature, à l'état natif, par exemple au lac Supérieur, à côté du cuivre natif. On le rencontre surtout à l'état de sulfure d'argent, de sulfure double d'arsenic et d'argent, ou enfin de sulfure double d'antimoine et d'argent.

OXYDES D'ARGENT.

L'argent forme avec l'oxygène trois oxydes : un sous-oxyde, Ag^2O ; un protoxyde, AgO; et un bioxyde AgO^2. Le protoxyde AgO est le seul qui présente de l'intérêt.

504 **Protoxyde d'argent** (AgO). — C'est un corps pulvérulent, brun, légèrement soluble dans l'eau à laquelle il communique une réaction alcaline. Cette dissolution ramène au bleu la teinture rouge de tournesol et verdit le sirop de violettes. — La chaleur le décompose rapidement. La lumière agit de même, mais lentement.

L'oxyde d'argent, très-instable quand il est libre, est une base puissante, capable de saturer les acides les plus énergiques. On le prépare en traitant par la potasse une dissolution étendue d'azotate d'oxyde d'argent et desséchant le précipité.

AZOTATE D'OXYDE D'ARGENT (AgO, AzO^5).

505. **Propriétés.**— C'est un sel anhydre, cristallisé en lamelles qui appartiennent au prime droit à base rhombe Il est soluble dans son poids d'eau froide. — Chauffé au rouge sombre, il fond sans se décomposer ; au rouge vif, il se décompose en laissant pour résidu de l'argent métallique.

L'azotate d'oxyde d'argent est un caustique énergique; il corrode la peau en y laissant une tache noire. — Fondu et coulé en petits bâtons dans une lingotière, il est employé pour ronger les chairs et constitue alors ce qu'on appelle la *pierre infernale*.

La propriété que possède l'azotate d'oxyde d'argent de se réduire au contact des matières organiques fait employer sa dissolution pour marquer le linge.

Pour préparer l'azotate d'oxyde d'argent, on dissout dans l'acide nitrique l'argent des monnaies. Il se forme de l'azotate d'oxyde d'argent et de

l'azotate d'oxyde de cuivre. Si on chauffe le mélange au rouge sombre, l'azotate d'oxyde de cuivre se décompose seul, et laisse de l'oxyde de cuivre insoluble, mêlé à l'azotate d'oxyde d'argent fondu. Il suffit de reprendre par l'eau pour dissoudre le sel d'argent qui cristallise par évaporation.

CHLORURE D'ARGENT (Ag Cl).

506. **Propriétés**. — Le chlorure d'argent s'obtient en traitant une dissolution d'azotate d'oxyde d'argent par l'acide chlorhydrique ou par un chlorure alcalin ; il se précipite sous forme d'une masse blanche, *caillebotée*, très-dense, insoluble dans l'eau et dans les acides étendus. — Il est très-soluble dans l'ammoniaque ainsi que dans les hyposulfites alcalins et dans le cyanure de potassium.

Ce chlorure, chauffé, fond vers 400°, en un liquide qui, refroidi, présente l'aspect de la corne (*argent corné*).

Le chlorure d'argent est facilement décomposé par la lumière; il perd alors une partie de son chlore et laisse un résidu violet-noirâtre, insoluble dans l'ammoniaque et l'hyposulfite. Cette propriété est utilisée en *photographie* (voir la *Physique*).

On peut décomposer le chlorure d'argent en calcinant ce corps dans un creuset, avec un mélange de craie et de charbon. On utilise cette réaction pour obtenir de l'argent pur.

Le chlorure d'argent existe dans la nature cristallisé en cubes.

507. **Caractères des sels d'argent**. — Les sels d'argent sont incolores, quand leur acide est lui-même incolore ; ils ont une saveur métallique très-désagréable. Ils sont tous facilement décomposés par les matières organiques et laissent un résidu noir.

La *potasse* et la *soude* donnent dans les sels d'argent un précipité brun insoluble dans un excès de réactif. — L'*ammoniaque*, un précipité brun, soluble dans un excès de réactif. — L'acide *sulfhydrique* et les sulfures alcalins y produisent un précipité noir.

L'acide chlorhydrique et les chlorures solubles y donnent un précipité blanc dont les propriétés (506) sont caractéristiques.

Le fer, le zinc, le cuivre précipitent de ses dissolutions l'argent en poudre grise. Le mercure le précipite et produit un amalgame cristallisé (*arbre de Diane*).

ESSAIS DES ALLIAGES D'ARGENT.

508. **Alliages**. — Nous avons indiqué (299) la composition des principaux alliages d'argent et de cuivre employés dans la fabrication des monnaies, des médailles, de la vaisselle d'argent et des objets de bijouterie. Pour déterminer le *titre* exact de ces alliages, on peut avoir re-

cours à deux procédés différents : la *coupellation* et la *voie humide*.

509. **Essai par coupellation.** — La coupellation est fondée : 1° sur ce que l'argent chauffé et maintenu en fusion ne s'oxyde pas à l'air, tandis que les autres métaux, et notamment le cuivre, s'oxydent à cette température ; 2° sur ce que le plomb, en s'oxydant donne un oyxde (litharge) fusible, capable de pénétrer par imbibition dans les terres poreuses, et susceptible de dissoudre et d'entrainer avec lui l'oxyde de cuivre infusible à la température à laquelle on opère.

Fourneau de coupelle. — Pour faire une coupellation, on emploie un fourneau à réverbère (*fig.* 180), au milieu duquel se trouve un demi-cylindre ou *moufle* en terre réfractaire, fermé à une de ses extrémités, et présentant sur ses parois des fentes qui attirent vers le foyer l'air qui arrive par l'ouverture et passe dans la moufle.

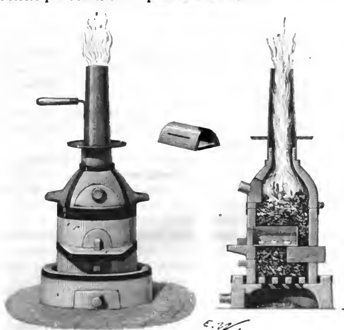


Fig. 180. — Fourneau de coupellation.

Quand la moufle est portée au rouge, on y dépose la *coupelle*, petite capsule épaisse et poreuse, formée avec de la cendre d'os calcinés ; puis, dans cette coupelle, on met du plomb. Aussitôt que le plomb est fondu, on y ajoute l'alliage, enfermé dans un morceau de papier qui, en se carbonisant, réduit la pellicule d'oxyde déjà formée à la surface du plomb, et permet à ce métal de se combiner avec l'argent et le cuivre.

Marche de l'opération. — L'alliage ternaire fondu se trouve soumis à

l'action du courant d'air oxydant qui traverse la moufle. Le plomb et le cuivre s'oxydent et forment à la surface du bouton métallique une pellicule mobile qui se renouvelle au fur et à mesure qu'elle s'infiltre dans la coupelle. Au moment où l'opération se termine, la pellicule ne se renouvelant plus, diminue d'épaisseur et présente les colorations des lames minces (*iris*), puis, cette pellicule disparaissant complétement, laisse à nu le bouton d'argent métallique qui apparaît très-brillant, grâce à ce que la chaleur dégagée par l'oxydation du plomb et du cuivre a élevé sa température bien au-dessus de celle de la moufle; c'est le phénomène de l'*éclair*. Le bouton, revenant rapidement à la température du fourneau, cesse d'être brillant; on rapproche la coupelle de l'ouverture de la moufle, pour que le refroidissement soit lent, et par suite, ne détermine pas de *rochage*. Une fois le bouton solidifié, on le détache de la coupelle et on le pèse. La différence entre son poids et le poids de l'alliage donne le poids du cuivre.

Remarque. La quantité de plomb à employer dépend du titre de l'alliage. On emploie pour 1gr d'alliage 3gr de plomb si le titre est 950, 7gr si le titre est 900, et 10gr si le titre est 800.

La coupellation permet de retirer des traces d'argent du plomb argentifère. Cependant, employé pour essayer un alliage, elle ne donne pas un résultat rigoureusement exact, grâce à la vaporisation d'une très-faible quantité d'argent ou à la pénétration d'une petite quantité de ce métal dans la coupelle. L'erreur peut être quelquefois de 3 à 4 millièmes.

510. **Essai par voie humide.**— Gay-Lussac a donné une méthode qui permet d'obtenir à un demi-millième près le titre d'un alliage de cuivre et d'argent.

Cette méthode repose sur ce fait qu'une dissolution d'un chlorure alcalin versé dans une dissolution d'un mélange d'azotate d'oxyde d'argent et d'azotate d'oxyde de cuivre, précipite tout l'argent à l'état de chlorure très-dense qui se réunit, laissant une dissolution parfaitement limpide qui retient tout le cuivre.

Liqueur normale. — Avant tout essai, on prépare : 1° une liqueur *normale* contenant, par décilitre, 0gr,5417 de chlorure de sodium, quantité susceptible de précipiter exactement un gramme d'argent; 2° une liqueur *décime* qui contient la même quantité de sel marin par litre, de telle sorte qu'un centimètre cube de cette liqueur précipite un milligramme d'argent.

Marche a suivre. — Si l'on veut essayer un alliage, on en prend un poids tel qu'au titre qu'on lui suppose, il contienne 1gr d'argent. Supposons que par exemple on veut savoir si un alliage monétaire est acceptable. Comme le titre est 900 millièmes, avec tolérance de 2 millièmes, on sait que l'alliage ne devra être rejeté que s'il contient moins de 898 millièmes d'argent. Or, s'il en contenait seulement 897 millièmes, il

faudrait, pour avoir 1gr d'argent, prendre un poids x déterminé par la proportion $x : 1^{gr}, 1000 :: 897$, ou $x = \frac{1000}{897} = 1^{gr},1148$. On dissout ce poids dans un flacon contenant un peu d'acide azotique et chauffé au bain-marie. Puis, quand tout est dissout, on ajoute 1 décilitre de la liqueur normale, et, après avoir agité le mélange, on le laisse reposer. S'il y a encore de l'argent, c'est-à-dire si le titre est supérieur à 897, on le reconnalt en ajoutant à la liqueur éclaircie 1 centimètre cube de la liqueur décime qui précipite 1 milligramme d'argent, et on répète cette addition jusqu'à ce qu'un nouveau centimètre cube ne produise plus de précipité. Pour avoir la quantité d'argent contenu dans le poids d'alliage essayé, on note le nombre de centimètres cubes qui ont produit un précipité; mais, comme le dernier centimètre cube qui a donné un précipité peut n'avoir pas été complétement employé, on admet que la moitié seulement a servi. Si, par exemple, le troisiéme centimètre cube n'a rien produit, la quantité d'argent de l'alliage sera 1,0015, et le titre $\frac{1,0015}{1,1148} = 0,8983$.

Si le premier centimètre cube de la liqueur décime ajouté ne produit rien, c'est que le titre est égal au plus à 897, et l'alliage doit être rejeté. On peut connaître d'ailleurs son titre exact avec une liqueur décime d'argent contenant 1gr d'argent par litre.

OR (Au).

Équiv. en poids = 98,2

511. **Propriétés.** — L'or est un métal doué d'une belle couleur jaune caractéristique. Sa densité est 19,5. Il fond vers 1200°, et se volatilise à une température plus élevée, en donnant des vapeurs vertes. — C'est le plus ductile et le plus malléable de tous les métaux ; on peut le réduire en feuilles de $\frac{1}{10000}$ de millimétre d'épaisseur. — Ces feuilles laissent passer la lumiére verte.

L'or est inaltérable à l'air à toutes les températures. — Le chlore et le brôme sont les seuls métalloïdes qui l'attaquent à froid. — Le mercure le dissout facilement à toute température. — Les acides sulfurique, azotique et chlorhydrique employés isolément sont sans action sur lui. — L'eau régale le dissout en donnant du sesquichlorure d'or (Au^2Cl^3).

OXYDES D'OR.

512. **Composition.** — L'or forme, avec l'oxygéne, deux oxydes :

1° Un *sous-oxyde* (Au^2O), poudre d'un violet foncé, insoluble dans l'eau,

décomposable à 250° en or métallique et en oxygène. On l'obtient en décomposant le protochlorure d'or par la potasse.

2° Un *sesquioxyde d'or* (Au^2O^3). Cet oxyde, appelé aussi acide *aurique*, est une poudre brune, décomposable également vers 250° en or et oxygène. Cet oxyde se combine avec les alcalis pour former des *aurates*. On le prépare en décomposant à la température d'ébullition le sesquichlorure d'or par le carbonate de soude.

CHLORURES D'OR.

513. **Composition.** — L'or forme deux chlorures correspondants aux oxydes.

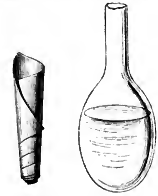
SESQUICHLORURE. — Le sesquichlorure d'or (Au^2Cl^3) est le plus important : c'est une matière cristalline, d'un rouge brun, déliquescente à l'air, très-soluble dans l'eau, décomposable par la chaleur en chlore et *sous-chlorure* (Au^2Cl) ; il s'obtient en faisant dissoudre de l'or dans l'eau régale et évaporant à une douce chaleur.

514 **Caractères des sels d'or.** — Les sels d'or donnent, avec le sulfate de protoxyde de fer, un précipité pulvérulent d'or métallique. La potasse et la soude en précipitent un oxyde à la température d'ébullition.

Un mélange de protochlorure et de bichlorure d'étain y détermine un précipité violet appelé *pourpre de Cassius*, employé pour la peinture des porcelaines ou des verres.

ESSAI DES ALLIAGES D'OR.

515. **Essai par coupellation.** — L'essai des alliages d'or se fait par la coupellation ; mais, pour arriver à des résultats exacts, il faut commencer par ajouter à l'alliage une quantité d'argent triple de celle de l'or qu'il est supposé contenir. La coupellation se fait comme à l'ordinaire ; à la fin de l'expérience le bouton peut être refroidi sans précaution, car l'alliage d'or et d'argent ne roche pas. Ce bouton, passé au laminoir, et réduit en lame, doit être recuit, contournée en cornet (*fig.* 181) et introduit dans un matras d'essayeur (*fig.* 182), avec de l'acide azotique à 22° Baumé. Après quelques minutes d'ébullition, on décante la liqueur et on la remplace par de l'acide plus


Fig. 181. Fig. 182.

concentré ; on fait bouillir de nouveau, et tout l'argent se dissout. On décante et on lave à l'eau distillée. Le cornet d'or pur qui reste n'a pas assez de cohésion pour qu'on puisse le manier et le peser; il faut, pour lui donner de la solidité, le faire tomber dans un creuset et le chauffer au rouge.

516. **Essai au touchau**. — L'essai des bijoux se fait en frottant l'objet sur une pierre siliceuse noire trés-dure, nommée pierre de touche, De part et d'autre de la trace métallique laissée par l'alliage, on fait un trait avec des alliages en proportion connue et entre lesquels on suppose que le titre du bijou se trouve compris, puis on passe sur ces trois traits un bouchon de verre imprégné d'un mélange d'acide azotique avec très-peu d'acide chlorhydrique. La couleur des traces permet à un essayeur expérimenté de reconnaître le titre à 1 centième prés.

PLATINE (Pt).

Équiv. en poids = 98,5

517. **Propriétés physiques**. — Le platine est un métal d'un blanc grisâtre dont la densité est 22. Il est très-malléable, très-ductible et très-tenace. Il ne fond qu'aux feux de forge les plus violents ou à la température du chalumeau à gaz de l'éclairage alimenté par l'oxygène.

Le platine fondu absorbe l'oxygène comme l'argent et *roche* comme ce métal par refroidissement.

Porosité du platine. — Le platine est très-poreux et s'échauffe en condensant les gaz. — Cette propriété est surtout remarquable dans la *mousse* ou *éponge* de platine, que l'on obtient par la calcination du chlorure double de platine et d'ammoniaque, et dans le *noir* de platine qui se précipite quand on traite la dissolution de chlorure de platine par une dissolution alcoolique de potasse. — Le noir de platine détermine l'oxydation de l'alcool absolu, et souvent avec inflammation.

Nous avons vu (6) que l'éponge de platine introduite dans une éprouvette pleine de gaz oxygène et hydrogène y devient incandescente, et détermine la combinaison des deux gaz avec explosion. Un courant d'hydrogène dirigé sur de la mousse de platine dans l'air (44) y produit également une incandescence qui enflamme l'hydrogène (*briquet à hydrogène*).

Le platine forgé présente encore ces propriétés, quoique à un moindre degré, même lorsqu'il a été fondu. A la température ordinaire, il ne paraît pas poreux ; mais, à une température plus élevée, il condense les gaz en s'échauffant, et détermine alors la combustion des gaz combustibles au contact de l'air. C'est ce que l'on constate de la manière suivante : on suspend (*fig.* 183) une spirale de platine au-dessus de la mèche d'une lampe à alcool, puis après avoir allumé la lampe de manière à

rougir la spirale, on l'éteint en soufflant dessus, le fil de platine reste lumineux, la vapeur d'alcool se combine dans les pores du platine avec l'oxygène de l'air, et cette combustion dégage assez de chaleur pour maintenir le métal à l'incandescence. Un phénomène analogue se produit quand on suspend (*fig.* 184) dans un verre contenant un peu d'éther et d'alcool, une spirale de platine préalablement portée au rouge. La spirale reste incandescente tant qu'il y a de l'air susceptible de brûler la vapeur d'éther. On a utilisé cette propriété du platine dans la lampe des mineurs (282).


Fig 183. — Spirale sur la lampe à alcool.


Fig. 184. — Lampe sans flamme.

518. **Fusion du platine.** — MM. H. Sainte-Claire Deville et Debray ont donné un procédé pour obtenir de très-grandes masses de platine fondu.

Ils introduisent peu à peu le métal en lames dans une grande coupelle de chaux vive, fermée par un couvercle de même matière. Un chalumeau à gaz de l'éclairage alimenté par de l'oxygène, pénètre dans la partie centrale de la voûte de cette espèce de fourneau à réverbère. — Le métal, une fois fondu, peut être coulé dans une lingotière en fer, recouverte de plombagine. — La chaux joue dans ces fours un rôle chimique important; elle agit sur toutes les impuretés dont on a intérêt à débarrasser le platine. Ce n'est donc pas une simple fusion que l'on fait éprouver au platine, c'est un affinage, et même un affinage très-complet.

519. **Propriétés chimiques.** — Le platine ne s'oxyde à aucune température au contact de l'oxygène ou de l'air. — Le soufre, le phosphore, l'arsenic, le bore et le silicium peuvent se combiner directement avec lui.

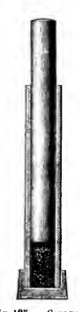
Il faut éviter de chauffer les creusets de platine au contact des charbons, car la silice que contient toujours le charbon se réduit, sous la double influence du charbon et du platine qui absorbe le silicium réduit.

Les acides chlorhydrique, sulfurique et azotique, isolés, sont sans action sur le platine. Ce métal se dissout dans l'eau régale, en donnant du bichlorure, $PtCl^2$. — Le platine est facilement attaqué par les alcalis en présence de l'oxygène, grâce, à sa tendance à former un oxyde acide.

520. **État naturel.** — Le platine existe à l'état natif dans les sables d'alluvions anciennes. On le trouve en Colombie, dans la Nouvelle-Grenade, au Brésil, en Californie et dans les monts Ourals. Il se pré-

sente d'ordinaire en grains rugueux ou en paillettes mélangées avec de l'or et d'autres métaux.

521. **Extraction**. — Pour extraire le platine de son minerai, on sépare d'abord l'or par le mercure ou par l'eau régale très-faible, puis on attaque la matière par l'eau régale à chaud. Le platine se dissout en laissant un résidu insoluble. La dissolution, traitée par le chlorhydrate d'ammoniaque, donne un précipité jaune de chlorure double de platine et d'ammonium. Ce précipité lavé, séché et calciné au rouge, donne la mousse de platine. Jusque dans ces derniers temps, cette mousse, réduite en poudre et délayée avec de l'eau, était fortement comprimée (*fig.* 185) dans un cylindre creux de fer, de manière à acquérir un peu de cohésion, puis chauffée au rouge blanc et martelée. MM H. Sainte-Claire Deville et Debray ont substitué à ce mode d'agrégation long et pénible le mode de fusion dont nous avons parlé (518).


Fig. 185. — Compression du platine.

OXYDES DE PLATINE.

522. **Composition**. — Le platine forme avec l'oxygène deux oxydes; un protoxyde, PtO, base faible, et un bioxyde, PtO^2, qui joue généralement le rôle d'acide. Ces deux corps se présentent sous forme d'une poudre noire facilement réductible par la chaleur. On les prépare en décomposant les chlorures correspondants par la potasse; il faut avoir soin de ne pas ajouter un excès de cet alcali.

CHLORURES DE PLATINE.

523. **Bichlorure de platine** ($PtCl^2$). — Le bichlorure de platine se présente sous forme d'une masse brune cristalline et déliquescente.

Ce corps forme avec le chlorure de potassium et avec le chlorhydrate d'ammoniaque des chlorures doubles qui cristallisent en octaèdres réguliers, et dans lesquels le bichlorure de platine joue le rôle d'acide vis-à-vis du chlorure alcalin.

Le chlorure de sodium ne produit pas de précipité dans les mêmes circonstances, parce que le chlorure double de platine et de sodium est excessivement soluble.

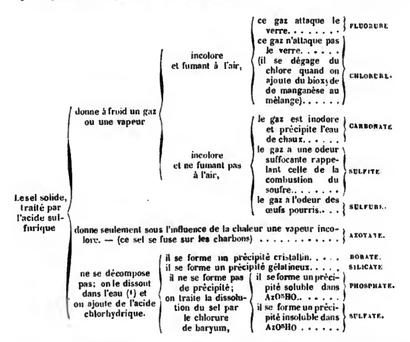
On prépare le bichlorure de platine en dissolvant le platine dans l'eau régale et évaporant à une douce chaleur, de manière à chasser l'excès d'acide.

524. **Protochlorure de platine** (PtCl). — Le protochlorure de platine est brun verdâtre, insoluble dans l'eau. L'acide chlorhydrique le dédouble en platine métallique et en bichlorure. La chaleur le décompose. — On le prépare en chauffant le bichlorure à une température voisine de 200°. Il se dégage du chlore, et il reste du protochlorure.

525. **Caractères des sels de platine.** — Les sels solubles de platine se reconnaissent par l'action du chlorure de potassium qui donne un précipité jaune de chlorure double de platine et de potassium, tandis que les sels de soude ne donnent pas de précipité. L'acide sulfhydrique donne un précipité noir soluble dans les sulfures alcalins. Le zinc et le fer en précipitent à chaud du platine métallique.

MÉTHODE A EMPLOYER POUR RECONNAITRE LE GENRE D'UN SEL.

526. **Réactifs.** — L'acide sulfurique seul ou aidé de quelques autres réactifs simples, suffit pour déterminer rapidement le genre d'un sel, ainsi qu'on peut le voir par le tableau suivant :



¹ Si le sel est insoluble dans l'eau on le calcine avec du carbonate de potasse ou de soude ; l'alcali forme avec l'acide du sel un composé soluble.

MÉTHODE A EMPLOYER POUR RECONNAITRE LA BASE D'UN SEL

527. **Réactifs.** — Cette méthode est fondée sur les réactions de l'acide sulfhydrique et des sulfures alcalins sur les dissolutions salines. — L'acide sulfhydrique, versé dans une dissolution saline *acidulée*, précipite le métal, s'il appartient à l'une des trois dernières sections, parce que les sulfures de ces métaux sont insolubles dans l'eau et indécomposables par les acides étendus; il ne donne pas de précipité si le métal est de l'une des trois premières sections, parce que les sulfures de ces métaux sont solubles ou ne peuvent se former en présence des acides.

Si on a ainsi reconnu que le métal appartient à l'une des trois dernières sections, on traite le sulfure insoluble obtenu par un sulfure alcalin ; il se dissout s'il peut jouer le rôle de *sulfacide* (or, platine, étain), il ne se dissout pas s'il ne peut jouer ce rôle (plomb, cuivre, mercure, argent). Quelques réactions caractéristiques suffisent alors pour fixer la nature du sel.

La détermination d'un métal de l'une des trois premières sections se fait aussi facilement ; car en versant dans la dissolution saline *neutre* un sulfure alcalin, on obtient un précipité si le métal est un métal terreux ou de la troisième section, on n'a pas de précipité si c'est un métal alcalin ou alcalino-terreux. On achèvera la détermination du métal à l'aide de quelques réactions caractéristiques. — Il est bien entendu que l'on doit toujours vérifier la conclusion à laquelle on arrive à l'aide des caractères indiqués à propos de chaque métal.

Remarque. Pour aciduler la liqueur au commencement de l'expérience, on choisit l'acide chlorhydrique, qui a l'avantage de dispenser de toute recherche ultérieure si le sel est à base d'oxyde de plomb, de sous-oxyde de mercure ou d'oxyde d'argent. Dans ces cas, en effet, il se forme un précipité blanc de chlorure insoluble ou peu soluble. Si ce précipité est soluble dans une grande quantité d'eau, c'est un sel de plomb ; s'il y est insoluble, on le traite par l'ammoniaque, qui le dissout si c'est un sel d'argent, et le noircit sans le dissoudre si c'est un sel de sous-oxyde de mercure.

Le tableau suivant fera ressortir la suite des opérations à effectuer dans les cas ordinaires.

Dans la liqueur acidulée par HCl, on verse de l'acide sulfhydrique.	il se forme un précipité coloré, on le lave et on le traite par AzH^3,HS,	il se dissout....	le sulfure était..	noir..	la liqueur primitive traitée par le sulfate de fer	donne un précipité.	SEL D'OR.
						ne donne pas de précipité........	SEL DE PLATINE.
				jaune....................			SEL DE BIOXYDE D'ÉTAIN.
				brun.....................			SEL DE PROTOXYDE D'ÉTAIN
		il ne se dissout pas.	le sulfure était noir, traité par l'acide azotique étendu,	il ne se dissout pas.............			SEL D'OXYDE DE MERCURE.
				il se dissout; on traite la liqueur par l'acide sulfurique	il se produit un précipité blanc....		SEL DE PLOMB.
					il ne se produit pas de précipité....		SEL DE CUIVRE.
	il ne se forme pas de précipité ; la liqueur neutralisée est traité par $AzH^3.HS$,	il y a un précipité,	noir............................				SEL DE FER.
			blanc........	il s'est produit en même temps un dégagement de gaz HS [1]...........			SEL D'ALUMINE.
				il ne se produit pas de dégagement de gaz....................			SEL DE ZINC.
		il n'y a pas de précipité; on traite la liqueur par le carbonate d'ammoniaque et on fait bouillir,	il y a un précipité: on le redissout dans HCl, et on ajoute du carbonate d'ammoniaque,	pas de précipité.................			SEL DE MAGNÉSIE.
				précipité; on traite par l'acide sulfurique très-étendu.	précipité insoluble..		SEL DE BARYTE.
					pas de précipité...		SEL DE CHAUX.
			pas de précipité; on fait bouillir avec de la potasse,	il se dégage de l'ammoniaque.......			SEL AMMONIACAL.
				il ne se dégage rien; on traite par $PtCl^2$	précipité jaune...		SEL DE POTASSE.
					pas de précipité...		SEL DE SOUDE.

[1] *Le sulfure d'aluminium ne se forme pas dans ces conditions; l'alumine est précipitée par l'ammoniaque du sulfhydrate.*

CHAPITRE X.

Métallurgie. — Traitement préliminaire des minerais. — Métallurgie de l'or, de l'argent, du mercure, du cuivre, du plomb, de l'étain, du zinc et du fer. — Fontes. — Aciers.

—

MÉTALLURGIE.

528. **Minerais.** — Les métaux se trouvent quelquefois à l'état natif, mais le plus souvent ils existent à l'état de combinaison, soit avec l'oxygène, soit avec le soufre. On appelle minerais les composés naturels d'où on retire les métaux.

Pour les métaux communs, comme le fer, on ne considère comme minerais que les oxydes ou les carbonates dont le traitement est facile et partant peu dispendieux. Pour les métaux d'une plus grande valeur, comme le cuivre, le mercure et l'argent, on exploite de plus le sulfure, dont le traitement est généralement plus pénible.

529. **Traitement.** — Le minerai, au sortir de la mine, doit être soumis successivement à deux traitements : l'un mécanique, destiné à le séparer de sa gangue, l'autre chimique, destiné à isoler le métal.

Traitement mécanique. — Il consiste d'abord dans un *triage à la main* qui partage le minerai en trois parties : la première, composée de minerai à peu près pur, est susceptible d'être envoyée à l'usine où se fera le traitement chimique ; la seconde, composée à peu près uniquement de gangue, peut être immédiatement rejetée ; enfin, la troisième, formée de gangue et de minerai, doit subir un broyage entre des cylindres cannelés qui divisent les morceaux en fragments plus petits, qu'un triage mécanique sépare en trois parties analogues aux précédentes. — Les nouveaux fragments composés de gangue et de minerai sont alors broyés entre des cylindres unis, puis soumis au *bocardage* ou pulvérisation ; et enfin au lavage, qui produit un dernier triage, grâce à l'inégale densité du minerai et de sa gangue.

Traitement chimique. — 1° Les minerais formés par des oxydes sont en général décomposés par le charbon. On obtient ainsi le métal, ou un composé du métal avec le carbone (*fonte*), avec lequel on prépare facilement ensuite le métal lui-même. — Si le minerai est un carbonate, on le traite de même, soit immédiatement, soit après une calcination qui chasse l'acide carbonique.

2° Les minerais formés par les sulfures sont soumis en général à des *grillages* à l'air, qui leur font perdre une grande partie de leur soufre à l'état d'acide sulfureux. Le plus souvent, le métal en se désulfurant se combine avec l'oxygène de l'air; on l'isole alors, comme les précédents, par le charbon.

Nous allons montrer l'application de ces règles générales dans quelques-unes des métallurgies les plus importantes.

530. **Métallurgie de l'or.** — L'or est un des métaux les plus répandus dans la nature, mais on ne le trouve toujours qu'en très-petites quantités ; il existe tantôt à l'état natif, tantôt en combinaison avec l'argent, le plomb et le cuivre. On le rencontre généralement sous forme de paillettes, disséminées, soit dans des sables d'alluvions anciennes, comme en Californie, dans les monts Ourals et dans l'Australie, soit dans les roches dont la désagrégation a produit ces sables d'alluvion.

Pour extraire l'or des sables aurifères, on les soumet à un traitement mécanique qui consiste à éliminer, par un lavage, la plus grande partie des matières terreuses de manière à ne laisser que peu de sable avec l'or. Ce lavage s'exécute soit dans des sébilles de bois, soit sur des tables inclinées, présentant des rainures dans lesquelles s'arrêtent les paillettes d'or.

Le traitement chimique consiste à agiter l'or (mêlé d'un peu de sable) avec du mercure qui dissout l'or et laisse le sable.

L'amalgame ainsi obtenu est comprimé dans une peau de chamois. L'excès de mercure filtre à travers les pores de la peau, et il reste un amalgame solide que l'on soumet à l'action de la chaleur ; le mercure se vaporise, l'or reste dans la cornue.

Quand l'or existe associé aux minerais de plomb, de cuivre ou d'argent, on traite ces minerais comme si on voulait en extraire seulement le plomb, le cuivre ou l'argent ; l'or est entraîné avec le métal, on l'en sépare ensuite par des moyens qui seront indiqués à propos de la métallurgie de ces divers métaux.

531. **Métallurgie de l'argent.** — L'argent existe dans la nature, soit à l'état natif, soit à l'état de sulfure, de chlorure ou d'arséniure. Le sulfure d'argent est le principal minerai. Les mines les plus riches sont celles du Mexique et du Pérou, dans le nouveau monde, celles de Saxe et Norvége dans l'ancien continent.

Quand le sulfure d'argent est intimement associé aux minerais de cuivre ou de plomb, on traite l'ensemble comme s'il ne contenait que le cuivre ou le plomb, et ce n'est qu'après l'extraction qu'on séparera l'argent de l'autre métal par des procédés que nous indiquerons à propos du cuivre et du plomb.

Quand le sulfure et le chlorure d'argent sont libres ou mélangés à de petites quantités seulement de pyrite, on emploie généralement la méthode de *chloruration* et *amalgamation*. Cette méthode consiste à faire passer tout l'argent à l'état de chlorure, que l'on dissout dans du chlorure de sodium, d'où l'on précipite ensuite l'argent à l'aide d'un autre métal plus chlorurable. L'argent pulvérulent agité avec du mercure se rassemble en formant un amalgame qui, décomposé par la chaleur, donne l'argent métallique.

Les moyens de chloruration et d'amalgation varient avec les conditions de l'exploitation, de là deux procédés complétement distincts:

1° Procédé de Freiberg. — Le minerai formé de sulfure d'argent disséminé dans de la pyrite est bocardé et mêlé ensuite avec $\frac{1}{10}$ de son poids de sel marin. On grille ce mélange dans un fourneau à réverbère; les sulfures combustibles passent à l'état d'oxydes en dégageant de l'acide sulfureux; il se forme en même temps de l'acide sulfurique qui réagissant sur le sel marin fournit du sulfate de soude et de l'acide chlorhydrique. Cet acide transforme l'argent en chlorure. — La masse ainsi obtenue est pulvérisée, lavée et introduite avec 30 kil. d'eau et 6 kilogr. de fer pour 100 kil. de matières dans des tonneaux qui peuvent tourner autour d'un axe horizontal; après les avoir fait tourner pendant une heure, on ajoute 5 kil. de mercure, et on fait tourner de nouveau pendant seize heures.

Le chlorure d'argent dissout dans l'eau chargée de sel marin est d'abord attaqué par le fer, qui donne du protochlorure de fer et de l'argent métallique très-divisé; le mercure s'amalgame ensuite avec l'argent pulvérulent. Cet amalgame, recueilli et filtré est soumis à l'action de la chaleur, le mercure se volatise, l'argent reste.

2° Procédé américain. — Au Mexique et au Chili la rareté du combustible force à opérer à froid. Le minerai composé de sulfo-arséniure et de sulfo-antimoniure d'argent, mêlé de chlorure d'argent et d'argent natif, est réduit en poudre impalpable, puis mélangé avec 2 à 3 pour 100 de sel marin. On porte le tout dans une aire circulaire pavée de dalles inclinées, où on le fait piétiner par des mules. Quelques heures après, on ajoute au mélange environ 1 pour 100 de pyrite de cuivre grillée à l'air (*magistral*), consistant principalement en sulfate de cuivre, et on fait piétiner de nouveau. Il se forme alors du sulfate de soude et du chlorure de cuivre qui, par son action sur le sulfure d'argent, donne du chlorure d'argent et du sulfure de cuivre. On ajoute en même temps du mercure qui, réagissant à la fois sur le chlore et sur l'argent du chlorure d'argent produit du chlorure de mercure et un amalgame d'argent. Au bout de quinze jours le mercure a dissous assez d'argent pour former une masse solide; on fait une seconde addition de mercure, puis une troisième; on continue ainsi jusqu'à ce qu'on ait employé environ huit parties de mercure pour une d'argent. Au bout de quelques mois, l'opération est terminée; on lave à grande eau; les matières salines et terreuses sont entraînées: l'amalgame seul reste au fond des vases. On en retire l'argent par l'action de la chaleur, comme dans le procédé Saxon.

532. **Métallurgie du mercure.** — Le mercure se rencontre quelquefois à l'état natif, en globules disséminés, dans des couches de bitume; mais son minerai ordinaire est le *cinabre* ou sulfure de mercure. Les principales mines de cinabre sont celles d'Almaden en Espagne, d'Idria en Illyrie, et du duché de Deux-Ponts en Bavière.

Dans les deux premières localités on extrait le mercure du cinabre par un simple grillage. On obtient du mercure en vapeur que l'on condense et de l'acide sulfureux qui se dégage.

$$HgS + 2O = SO^2 + Hg.$$

La seule différence que présentent les deux procédés employés consiste dans la disposition des appareils où se produit la condensation.

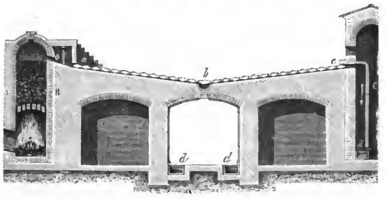


Fig. 186. — Extraction du mercure à Almaden.

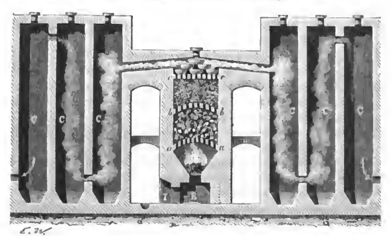


Fig. 187. — Extraction du mercure à Idria.

A Almaden, on place le sulfure de mercure dans la partie supérieure d'un fourneau (*fig.* 186), sous la voûte duquel on allume un feu de fagots. Sous l'influence de la chaleur et de l'oxygène de l'air qui passe par les ouvertures de la voûte, le sulfure de mercure est décomposé. L'acide sulfureux et le mercure pénètrent dans une série d'allonges (***aludèles***) em-

boîtées les unes dans les autres, et disposées sur deux plans *a, b, c*, inclinés en sens contraire. Le mercure condensé dans les aludèles se réunit dans une rigole, d'où il coule dans un réservoir. L'acide sulfureux entraînant encore des vapeurs mercurielles passe ensuite dans une chambre *c*, dans laquelle il est forcé de descendre jusque près du sol, à la surface d'une cuve *d* pleine d'eau où le reste du mercure se condense. L'acide sulfureux, après s'être refroidi dans cette chambre et y avoir abandonné tout le mercure, s'échappe par une cheminée d'appel.

A Idria, l'appareil de condensation (*fig.* 187) est constitué par deux séries de chambres dans lesquelles l'acide sulfureux et les vapeurs de mercure se refroidissent complétement.

Dans le duché de Deux-Ponts, où le sulfure de mercure est mêlé de calcaire, on chauffe le minerai avec sa gangue dans des cornues de terre munies d'allonges et placées les unes à côté des autres dans le fourneau.

Le sulfure de mercure est décomposé par la chaux, et donne du mercure en même temps que du sulfure de calcium et du sulfate de chaux.

$$4HgS + 4CaO = 3CaS + CaOSO^3 + 4Hg.$$

533. **Métallurgie du cuivre.** — Le cuivre existe dans la nature soit à l'état natif, comme dans l'Amérique du Nord, sur les bords du lac Supérieur; soit à l'état de sous-oxyde Cu^2O, ou de carbonate CuO,CO^2, comme au Pérou, au Chili et dans les monts Ourals; soit enfin à l'état de sulfure presque toujours combiné à du sulfure de fer et constituant la pyrite cuivreuse, Cu^2S,Fe^2S^3.

Le cuivre s'extrait facilement du sous-oxyde et du carbonate. Il suffit de fondre ces minerais avec du charbon dans des fourneaux à cuve. Le charbon, se combinant à l'oxygène de l'oxyde, passe à l'état d'acide carbonique, et le cuivre est ramené à l'état métallique. — Le cuivre brut ainsi obtenu est ensuite purifié par un affinage.

Traitement de la pyrite cuivreuse. — Les pyrites cuivreuses exigent un traitement plus pénible. Pour éliminer le soufre et le fer, on se fonde : 1° sur ce que par le grillage une partie du soufre passe à l'état d'acide sulfureux, tandis que les métaux désulfurés passent à l'état d'oxyde; 2° sur ce qu'un mélange d'oxyde de cuivre et de sulfure de fer donne, en présence de la silice à haute température, du sulfure de cuivre et de l'oxyde de fer qui, s'unissant à la silice, forme un silicate de fer très-fusible se séparant facilement du reste de la matière.

Un premier grillage de la pyrite cuivreuse, suivi d'une fusion en présence de matières siliceuses, donne une scorie renfermant la plus grande partie du fer de la pyrite et une *matte* qui contient presque tout le cuivre du minerai avec très-peu de fer, le tout à l'état de sulfure. Cette matte constitue un véritable minerai plus riche en cuivre que le minerai primitif.

De nouveaux grillages suivis de nouvelles fusions en présence de matières siliceuses donnent de nouvelles scories riches en fer et des mattes plus riches en cuivre. On arrive ainsi à une dernière matte composée presque uniquement de sulfure de cuivre qui, par un dernier grillage, donne de l'acide sulfureux et un cuivre impur appelé *cuivre noir*. Ce dernier renferme environ 95 pour 100 de cuivre, avec un peu de soufre et de fer.

Raffinage du cuivre noir. — On le soumet à un raffinage qui consiste à exposer le cuivre en fusion à un courant d'air oxydant en présence d'argile et de charbon. Il se dégage encore un peu d'acide sulfureux, et il se forme du silicate de fer. Quand l'affinage est terminé, on solidifie une partie de la surface en y jetant un peu d'eau froide, et on enlève à l'aide d'un ringard la partie solidifiée ou *rosette*. Le cuivre ainsi obtenu est livré au commerce.

Liquation du cuivre argentifère. — Quand le minerai de cuivre est argentifère, tout l'argent se retrouve dans le cuivre noir. On l'en retire par la méthode de *liquation :* on mêle au cuivre une certaine quantité de plomb, et on refroidit brusquement l'alliage coulé en disques, de manière à obtenir un mélange ternaire. Il suffit de réchauffer très-lentement ces disques pour que le plomb s'en écoule, entraînant avec lui tout l'argent. Le cuivre bien dépouillé du plomb est ensuite raffiné comme à l'ordinaire, tandis que le plomb argentifère est soumis à la coupellation (534).

534. Métallurgie du plomb. — Le plomb existe à l'état de sulfure, de carbonate, de phosphate et d'arséniate. Son principal minerai est le sulfure de plomb ou *galène*.

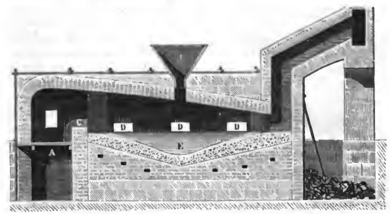


Fig. 188. — Traitement du minerai de plomb.

Le mode de traitement du minerai de plomb varie avec sa richesse et la nature des gangues qui l'accompagnent. — Quand le minerai bocardé est très-impur et que la gangue est très-siliceuse, on emploie

la méthode de *réduction;* quand, au contraire, le minerai est riche et peu siliceux, on opère par la méthode de *réaction.*

Méthode par réduction. — Le minerai est traité dans un fourneau à réverbère par de vieilles ferrailles ou par de la fonte grenaillée. Le fer enlève le soufre au plomb; il en résulte du plomb métallique et du sulfure de fer qui surnage et s'écoule dans un bassin latéral.

Méthode par réaction. — Le minerai grillé lentement dans un four à réverbère (*fig.* 188) se transforme partiellement en oxyde et en sulfate; il se dégage de l'acide sulfureux. On ferme alors toutes les ouvertures du fourneau, et on élève la température. L'oxyde et le sulfate réagissant sur le sulfure, donnent de l'acide sulfureux et du plomb métallique, ainsi que l'expriment les formules suivantes :

$$2PbO + PbS = SO^2 + 3Pb$$

$$PbOSO^3 + PbS = 2SO^2 + 2Pb.$$

Coupellation du plomb argentifère. — Le plomb ainsi obtenu est généralement argentifère. On en retire l'argent par une coupellation effectuée dans un fourneau dont la sole est creusée en forme de calotte sphérique. Le plomb se transforme en litharge qui coule par des ouvertures latérales; l'argent reste sur la coupelle.

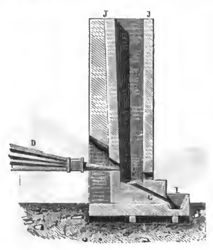


Fig. 189. — Fourneau à manche.

535. **Métallurgie de l'étain.** — Le seul minerai d'étain est le bioxyde d'étain (*cassitérite*). Il est très-abondant en Angleterre, en Saxe et dans les Indes.

Le traitement de ce minerai est le suivant : après l'avoir bocardé et lavé, on le soumet à un grillage et à un nouveau lavage pour le débarrasser des oxydes étrangers qui, étant plus légers, sont entraînés par l'eau. L'oxyde ainsi purifié est mêlé avec du charbon de bois et chauffé dans un fourneau à manche (*fig.* 189), où l'oxyde de carbone le réduit. L'étain coule dans un premier bassin extérieur où il s'accumule, et d'où on le fait passer ensuite dans un second récipient pour le séparer de la scorie.

536. **Métallurgie du zinc.** — Les minerais de zinc sont le sulfure de zinc ou *blende* et le carbonate de zinc ou *calamine.* On les rencontre en Angleterre, dans la haute Silésie et en Belgique, entre Liége et Aix-la-Chapelle.

TRAITEMENT PRÉLIMINAIRE. — La *blende* est d'abord soumise à un grillage qui transforme le soufre en acide sulfureux et le zinc en oxyde. Le premier traitement de la *calamine* consiste dans une calcination, qui, lui enlèvant son eau et son acide carbonique, la rend plus facile à diviser.

RÉDUCTION. — Le minerai ainsi préparé est mélangé avec son volume de houille sèche en petits fragments et soumis à l'action d'une température élevée; l'oxyde se réduit et le métal distille. Les procédés employés dans les divers pays ne diffèrent que par la forme des appareils dans lesquels on chauffe ce mélange.

Près de Liége, les cornues sont des cylindres de terre réfractaire *a* fermés par un bout et ouverts par l'autre; on les place sous une légère inclinaison au nombre de 48 dans les quatre compartiments d'un four représenté *fig.* 190.

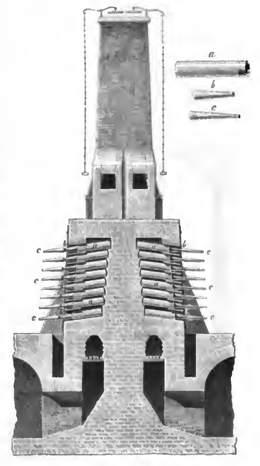


Fig. 190. — Extraction du zinc.

Le zinc vient se condenser dans le tuyau en fonte *b*, auquel on adapte une allonge *c* qui achève la condensation des vapeurs de zinc.

537. **Métallurgie du fer.** — Les principaux minerais de fer exploités sont les suivants :

1° L'oxyde de fer magnétique, Fe^3O^4, qui se rencontre en Suède et Norvége.

2° Le sesquioxyde de fer anhydre, Fe^2O^3; quelquefois il est cristallisé et prend le nom de *fer oligiste;* tel est le minerai de l'île d'Elbe et celui de Fromont dans les Vosges. Souvent il est en masses amorphes, compactes, et constitue alors l'*hématite rouge*.

3° Le sesquioxyde de fer hydraté, Fe^2O^3, HO, que l'on rencontre en Bourgogne sous forme de masses jaunes ou brunes, constituant la limonite, le fer oolithique ou l'hématite brune.

4° Le carbonate de fer, FeO, CO^2, ou fer spathique, que l'on rencontre à Saint-Etienne, à Anzin et dans la plupart des mines d'Angleterre, où il se trouve dans le voisinage du combustible nécessaire à son exploitation.

538. **Traitement du minerai.** — Le minerai de fer est toujours mêlé d'un peu d'argile. On peut le traiter par le charbon seul ou par un mélange de charbon et de carbonate de chaux; de là deux procédés distincts. Dans le premier (*méthode catalane*), le silicate d'alumine de l'argile se combine sous l'influence de la chaleur avec une partie



Fig. 191. — Fourneau catalan.

de l'oxyde de fer et forme une scorie très-fusible ; le reste de l'oxyde réduit par le charbon donne du fer à peu près pur. Dans le second procédé (*méthode des hauts fourneaux*), grâce à l'addition du calcaire, l'argile se sépare à l'état de silicate double d'alumine et de chaux, et on obtient tout le fer du minerai ; mais comme le silicate double d'alumine et de chaux est bien moins fusible que le silicate double d'alumine et de fer, il faut élever beaucoup plus la température ; dans ces conditions le métal, se combinant avec le charbon, passe à l'état de *fonte*. Une seconde opération est alors nécessaire, c'est l'affinage de la fonte qui a pour but de lui enlever son carbone et de la transformer en *fer ductile* ou *fer doux*.

MÉTHODE CATALANE. — Cette méthode expéditive, n'est employée que pour les minerais très-riches, dans les pays où le bois est abondant et les transports difficiles, comme dans les Pyrénées, en Corse et en Catalogne.

Le fourneau catalan (*fig.* 191) est un creuset carré construit dans un massif en maçonnerie. La tuyère D d'une soufflerie BAC arrive sur l'un des bords du creuset. On commence par remplir le creuset de charbon bien allumé, puis on place au-dessus deux tas distincts, l'un de minerai, l'autre de charbon ; ce dernier est en quantité double et disposé du côté de la tuyère. On fait marcher la soufflerie, d'abord doucement, puis de plus en plus fort. Le charbon brûlant sous le vent de la tuyère donne de l'acide carbonique qui au contact de l'excès de charbon incandescent, se transforme en oxyde de carbone. Cet oxyde de carbone traversant le minerai le réduit à l'état de fer métallique en repassant lui-même à l'état d'acide carbonique. — Une certaine quantité d'oxyde de fer est seulement ramenée à l'état de protoxyde et se combine avec l'argile pour former le silicate double d'alumine et de fer très-fusible qui constitue le laitier.

Cinq à six heures suffisent pour une opération. Le fer, rassemblé dans le creuset sous forme spongieuse, est placé sur une enclume et frappé par un marteau qui lui donne de la compacité. On le chauffe ensuite de nouveau et on le forge de manière à le réduire en barres.

Cette méthode, très-anciennement connue et très-expéditive, ne donne guère que 33 de fer pour 100 de minerai.

MÉTHODE DES HAUTS FOURNEAUX. — Le haut fourneau (*fig.* 192) se compose de deux troncs de cône réunis par leurs bases ; le cône supérieur BC ou la *cuve* est en briques réfractaires. Il se termine supérieurement par une ouverture appelée *gueulard*, surmontée d'une cheminée dans laquelle sont ménagées des portes par lesquelles se fait le chargement. Le cône inférieur DE ou les *étalages* est en pierres siliceuses infusibles. Au-dessous des étalages se trouve un cylindre EF en pierres réfractaires, appelé l'*ouvrage* dans la partie inférieure duquel viennent déboucher les trois tuyères d'une forte machine soufflante. Au-dessous de l'ouvrage se trouve le creuset, qui se termine antérieurement par une paroi nommée *dame*, devant laquelle existe un plan

incliné. Le creuset est percé inférieurement d'un *trou de coulée* qui pendant l'opération est bouché par un tampon d'argile.

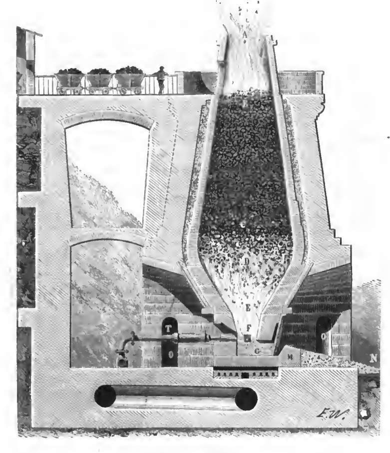


Fig. 192. — Haut fourneau.

La hauteur totale d'un haut fourneau est d'environ dix mètres quand il est alimenté par du charbon de bois, elle peut s'élever à 20 mètres quand il est alimenté par du coke.

Après avoir mis dans le haut fourneau une quantité suffisante de combustible, on ajoute des charges alternatives de *minerai*, de *castine* et de charbon dans le rapport d'environ 300 de minerai par 80 de castine et 110 de charbon. On met ensuite le feu et on fait jouer la machine soufflante.

Le charbon contenu dans l'ouvrage passe à l'état d'acide carboniqueen

dégageant beaucoup de chaleur. Cet acide carbonique rencontre en s'élevant du charbon incandescent qui le ramène à l'état d oxyde de carbone. Celui-ci arrive de la cuve, où il trouve du minerai chauffé au rouge sombre, et le réduit en repassant à l'état d'acide carbonique. Le fer ainsi réduit descend peu à peu dans les étalages avec sa gangue, la chaux qui provient de la décomposition de la castine, et le charbon. Là, sous l'influence d'une très-haute température, la gangue passe à l'état de silicate double d'alumine et de chaux, tandis que le fer passe à l'état de fonte. La fonte et le laitier se liquéfient complétement en traversant l'ouvrage et tombent dans le creuset, où le laitier, plus léger, reste à la surface ; dès qu'il déborde la dame il s'écoule sur le plan incliné d'où on l'enlève au fur et à mesure qu'il se solidifie. Au bout de 12 à 24 heures suivant les dimensions du haut fourneau le creuset est rempli ; on enlève le tampon d'argile, et la fonte coule dans de petits canaux demi-cylindriques creusés sur le sol de l'usine. La fonte se solidifie et se présente sous forme de demi-cylindres que l'on appelle *gueuses* ou *gueusets*, suivant leur longueur.

Le haut fourneau, une fois allumé, marche d'une manière continue ; on ne l'arrête que pour y faire des réparations, c'est-à-dire en général au bout de 12 à 15 mois.

La fonte ainsi obtenue peut être convertie en fer doux. Pour cela on la chauffe avec du charbon dans une cavité carrée où elle se trouve soumise à l'action oxydante d'un fort courant d'air. L'oxygène lui enlève son carbone, qui se dégage à l'état d'acide carbonique, et une partie de son silicium, qui passant à l'état d'acide silicique se combine avec un peu d'oxyde de fer pour former un silicate très-fusible. Cette opération constitue l'*affinage de la fonte*.

539. **Fontes**. — Les fontes sont des carbures de fer qui contiennent environ 5 pour 100 de carbone. Les diverses variétés de fonte peuvent se ramener à deux types : la *fonte grise* et la *fonte blanche*. La fonte grise a une couleur qui varie du gris noir au gris clair, elle est douce, se laisse limer et marteler ; la fonte blanche a une couleur argentine, elle est dure, se laisse difficilement attaquer à la lime, et se brise sous le choc.

Usages des fontes. — La fonte grise est employée à la fabrication *par moulage* des appareils et ustensiles de fonte dont on fait usage dans l'industrie et dans l'économie domestique. — Les objets grossiers et de grande dimension, comme tuyaux de conduite, etc., sont obtenus par un moulage de première fusion, c'est-à-dire en recevant la fonte au sortir du haut fourneau dans des moules en sable. — Les petits objets qui doivent avoir un fini plus grand sont obtenus en refondant la fonte dans de petits fourneaux à cuve ou *cubilots*, d'où la fonte est prise avec des *poches* en fer, pour être versée dans des moules convenablement préparés.

La fonte blanche est utilisée pour préparer le fer doux en barre.

Production de la fonte grise et de la fonte blanche. — Bien que la composition de ces deux fontes ne soit pas généralement la même, et que la fonte grise soit d'ordinaire plus riche en silicium que la fonte blanche, un haut fourneau peut donner, avec le même minerai et les mêmes proportions de castine et de charbon, soit l'une soit l'autre fonte, suivant la température à laquelle se fait l'opération : si la température est très-élevée, il se produit de la fonte grise, riche en silicium, grâce à l'action de la fonte sur la silice du laitier à haute température. Quand, au contraire, la température du fourneau n'est pas très-élevée, on obtient toujours de la fonte blanche. — Une fonte blanche refroidie très-lentement donne de la fonte grise, parce qu'une partie du carbone se sépare en paillettes cristallines noirâtres; réciproquement, une fonte grise fondue et refroidie brusquement donne de la fonte blanche.

540. **Aciers.** — On désigne sous ce nom un carbure de fer qui contient moins de carbone que la fonte. C'est un corps blanc, brillant et susceptible de prendre un très-beau poli. L'acier chauffé et refroidi lentement est ductile et malléable comme le fer; mais si on le refroidit brusquement en le *trempant* dans une grande masse d'un liquide froid (eau, huile, mercure), il devient dur, cassant et possède une grande élasticité. Pour donner à l'acier le degré de *trempe* convenable aux différents usages, on lui donne d'abord une trempe très-forte, puis on le recuit, et on juge de la trempe par les colorations que présente aux différentes températures l'acier ainsi chauffé.

Acier naturel, acier de cémentation. — On prépare l'acier soit en décarburant la fonte, ce qui donne l'*acier naturel*, soit en carburant le fer, ce qui donne l'*acier de cémentation*. Pour avoir l'acier naturel, on soumet la fonte dans un fourneau à réverbère à l'action d'un courant d'air soutenu pendant plusieurs heures. Pour avoir l'acier de cémentation, on chauffe fortement le fer avec un cément formé de charbon de bois pulvérisé, de suie et de sel marin. Pour cela, on dispose alternativement des couches de cément et des barres de fer dans de grandes caisses, dont la température peut être élevée par un foyer dont la flamme les entoure de toutes parts. On chauffe ainsi pendant douze à quinze jours suivant l'épaisseur des barres. En retirant de temps à autre une barre, on peut reconnaître le moment où l'opération est terminée. — Cet acier n'est pas homogène, les parties superficielles sont toujours plus carburées que l'intérieur.

Acier fondu. — On obtient un acier bien homogène et propre à tous les usages de la coutellerie et de la chirurgie, en fondant dans des creusets *brasqués*, de l'acier de cémentation coupé en petites barres et recouvert de charbon. Quand l'acier est devenu liquide on le coule dans des lingotières en fonte, puis on le martèle et on l'étire en barres.

SCIENCES NATURELLES

ZOOLOGIE

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

Définition du règne animal. — Distinction entre les corps bruts et les corps organisés, entre le règne animal et le règne végétal. — Principaux tissus animaux.

DÉFINITION DU RÈGNE ANIMAL

1. **Distinction entre les corps bruts et les corps organisés.** — L'ensemble des corps répandus à la surface de la terre et composant la matière, se divise naturellement en deux grands groupes : d'une part les *corps bruts, regnum minerale* ou *lapideum;* d'autre part les *corps organisés : corps vivants ou qui ont vécu.*

Entre ces deux groupes de corps il n'y a aucune transition, aucun passage : les uns naissent, se reproduisent et meurent; les autres se forment de toutes pièces, ne se reproduisent pas et n'arrivent pas comme terme fatal à la mort.

Les corps bruts doivent leur existence à la réunion de molécules soit élémentaires, soit composées, et animées par les seules forces de l'affinité. Ainsi le chimiste peut à coup sûr, en unissant sous certaines influences de l'hydrogène à de l'oxygène, produire de l'eau.

Les corps vivants, au contraire, naissent toujours de corps également vivants, plus ou moins semblables à eux, et il n'est pas au pouvoir des naturalistes d'en produire aucun.

Les corps bruts sont formés par la réunion d'un certain nombre d'atomes semblables et homogènes. On peut les diviser à l'infini sans rien changer à leur nature; leur forme et leur masse n'ont pas de terme fixe, et ils peuvent s'accroître indéfiniment par la *juxtaposition* de nouvelles particules semblables qui viennent s'ajouter aux premières. Les corps vivants sont constitués par la réunion de parties hétérogènes et dissemblables qui, par leur mode de groupement, forment les organes. On ne peut rien y ajouter, rien y retrancher, sans altérer l'individu. Ils s'accroissent toujours pendant un certain temps de leur existence par *intussuscep-*

tion, c'est-à-dire que les particules surajoutées sont introduites dans l'intérieur de leurs tissus qui, tout en augmentant de volume, conservent la même forme. Enfin ce volume est contenu dans certaines limites.

Les corps bruts peuvent se conserver indéfiniment; ils ne se détruisent que par accident, lorsqu'une cause quelconque vient disperser leurs molécules ou les engager dans d'autres combinaisons.

Les corps vivants, au contraire, ont une durée comprise entre certaines limites; ils produisent des êtres semblables à eux, et meurent lorsque le mouvement vital s'arrête en eux.

Tels sont les principaux caractères qui séparent le monde organisé du monde inorganique, et toutes ces différences sont dues à une seule et même cause, à l'absence ou à l'existence de la vie.

2. **Différence entre le règne animal et le règne végétal.** — Les corps organisés se partagent naturellement en deux catégories. L'une a pour type l'animal, l'autre la plante. Ils se divisent donc en deux règnes : le règne animal et le règne végétal. C'est par l'existence du mouvement et de la sensibilité que l'animal diffère essentiellement du végétal.

Les animaux se meuvent volontairement; leurs mouvements sont *autonomiques* et non *automatiques*. Quelques végétaux peuvent, dans certains cas et sous des influences diverses, exécuter quelques mouvements; mais ceux-ci sont automatiques. C'est ainsi qu'à l'approche de la nuit certaines feuilles se redressent ou s'abaissent; qu'à l'époque de la fécondation les étamines s'inclinent parfois sur le pistil. Les animaux seuls ont conscience des mouvements qu'ils exécutent. Or, l'idée de mouvement implique nécessairement la perception des sensations; en un mot, la sensibilité. Un animal n'ayant aucune conscience de lui-même n'exécuterait pas de mouvements volontaires. Les végétaux sont dans ce cas : chez eux les phénomènes de sensibilité proprement dite paraissent ne pas exister. En effet, on n'y trouve aucune trace du système nerveux qui, chez les animaux, régit tous les actes de mouvement et de sensation.

Les animaux, de même que les végétaux, croissent et se nourrissent par intussusception; mais le mode de nutrition diffère complétement. Tandis que les animaux sont pourvus d'un tube digestif destiné à la préparation et à l'absorption des matières nutritives, les végétaux n'ont pas besoin de préparer ces matières; mais, à l'aide de leurs racines, ils pompent dans le sol les sucs qui doivent les nourrir; et à l'aide de leurs feuilles ils dépouillent l'atmosphère des principes qu'ils fixent ensuite dans leurs tissus.

Les animaux, étant plus parfaits et mieux doués que les végétaux, ont une structure plus complexe et sont pourvus d'un plus grand nombre d'organes.

Les tissus des animaux n'offrent pas la même composition chimique

que les tissus végétaux. En effet, presque toujours ils sont composés d'oxygène, d'hydrogène, de carbone et d'azote; tandis que chez les plantes ces tissus ne contiennent que peu ou point de ce dernier principe.

En résumé, on peut donc dire que *les végétaux sont des êtres organisés qui se nourrissent et se reproduisent, mais qui ne sentent et ne se meuvent pas volontairement; tandis que les animaux sont des êtres organisés qui se nourrissent, se reproduisent, sentent et se meuvent.*

Quoique cette définition paraisse ne rien laisser à désirer, elle est quelquefois d'une application difficile. Il est en effet des végétaux qui simulent les caractères des animaux, et des animaux dont les fonctions s'exécutent d'une façon si obscure, qu'ils présentent les apparences de la vie végétative. — Complétement distincts l'un de l'autre par leurs types, le règne végétal et le règne animal paraissent sur le point de se confondre par leurs représentants les plus imparfaits; et ce n'est qu'à l'aide d'une attention soutenue et d'une critique sévère que l'on peut, dans certains cas tracer les limites qui les séparent.

3. **Différentes fonctions des animaux.** — Le règne animal se compose donc de tous les êtres organisés qui se nourrissent, se reproduisent, sentent et se meuvent volontairement.

Le nombre des animaux est immense; leurs formes varient à l'infini. On en voit d'une organisation tellement simple, qu'ils ressemblent à un morceau d'une gelée tremblante, tandis que d'autres, tels que l'homme, offrent une structure des plus complexes. C'est par conséquent aux animaux supérieurs qu'il faut s'adresser de préférence pour étudier l'ensemble de l'organisation animale.

Les phénomènes de la vie se divisent en deux grandes classes : les premiers doivent assurer la conservation de l'espèce et celle de l'individu : ce sont ceux de reproduction et de nutrition; les seconds ont pour but de mettre l'individu en relation avec le monde extérieur : ce sont les phénomènes de mouvement et de sensibilité.

On a désigné les premiers sous le nom de phénomènes de la *vie organique* ou *végétative*, les seconds sous le nom de phénomènes de la *vie animale ou de relation.*

Nous commencerons d'abord par l'étude des fonctions de nutrition, pour arriver ensuite à celles de relation.

Dans cette étude, nous examinerons d'abord :

1° La structure et la disposition des organes dont la réunion produit l'animal; en un mot, son anatomie.

2° Le jeu de ces différents organes et les phénomènes qui en sont la cause ou leur physiologie.

4. **Tissus animaux.** — Les différents tissus qui composent les corps animaux se composent d'un petit nombre d'éléments chimiques : les plus répandus sont le carbone, l'oxygène, l'hydrogène et l'azote. On peut citer

aussi. mais en seconde ligne, le soufre et le phosphore. De la combinaison et du groupement de ces différents éléments résulte ce que l'on nomme les ***principes immédiats*** formant la substance des tissus; les principaux sont la fibrine et l'albumine, qui, unis à de l'eau, à de la graisse, constituent à eux seuls presque tout le corps, en affectant cependant une structure très-variée.

Les tissus qui composent le corps des animaux sont au nombre de quatre : les tissus cellulaire, utriculaire, musculaire et nerveux.

Le ***tissu cellulaire*** ou connectif est répandu presque dans tout l'organisme; il sert de lien aux organes, et se présente sous la forme de lamelles et de filaments circonscrivant des sortes d'aréoles; c'est dans son épaisseur que se dépose la graisse.

Le ***tissu utriculaire*** n'est formé que de cellules accolées qui peuvent se modifier de diverses façons, s'étaler en lames pour constituer des membranes; ces dernières affectent différentes formes, et se distinguent en ***muqueuses*** et ***séreuses***. Les premières sont très-vasculaires et revêtent les cavités intérieures, telles que le tube intestinal; les autres, fines et transparentes, ne contiennent que peu de vaisseaux; elles servent à entourer les organes, et sécrètent un liquide transparent qui facilite les glissements des surfaces les unes sur les autres.

Le ***tissu musculaire*** consiste en fibres contractiles, c'est-à-dire jouissant de la propriété de se raccourcir.

Le ***tissu nerveux***, composé de fibres et de cellules, constitue les nerfs et les centres nerveux; c'est grâce à lui que les animaux perçoivent les sensations.

Les ***tissus osseux*** et ***cartilagineux*** ne sont que des modifications du tissu utriculaire, qui s'est chargé, soit de matières organiques spéciales, soit de sels minéraux.

DIGESTION.

Structure de l'appareil digestif et de ses annexes. — Nature des aliments. — Phénomènes chimiques de la digestion. — Sécrétions qui y concourent.

5. — ***La DIGESTION est une fonction à l'aide de laquelle les animaux séparent des matières alimentaires les principes susceptibles d'être absorbés, les élaborent, puis rejettent le résidu qu'ils ne peuvent utiliser.***

Cette fonction s'exécute dans un appareil spécial connu sous le nom d'APPAREIL DIGESTIF.

Afin de réparer les pertes de l'organisme, les animaux ont besoin de s'assimiler une certaine quantité de matières, dites nutritives. Les plantes peuvent, au moyen des éléments répandus autour d'eux, former de toutes pièces les principes constitutifs de leurs organes. Par conséquent,

elles n'ont pas besoin d'un tube digestif pour l'élaboration de ces matières; — les animaux, au contraire, ne jouissent pas de cette propriété de créer ainsi des matières organisables destinées à entrer dans la substance des êtres, ils les prennent toutes formées, ordinairement à l'état solide, et ont besoin de leur faire subir différentes préparations pour les rendre solubles, c'est-à-dire absorbables. Cette opération s'effectue en général dans l'intérieur d'une cavité appelée appareil digestif, qui communique au dehors et présente ordinairement une suite de renflements destinés, soit à emmagasiner les aliments, soit à les retenir plus longtemps, pour que l'élaboration en soit plus complète.

Pour que la digestion puisse s'effectuer, il faut que les aliments soient introduits dans l'intérieur du corps, qu'ils y soient soumis à l'action des sucs digestifs, et enfin que le résidu du travail élaborateur puisse être expulsé au dehors.

APPAREIL DIGESTIF DES ANIMAUX VERTÉBRÉS.

6. — Chez les animaux supérieurs on distingue dans l'appareil digestif les parties suivantes :

1° La bouche, — 2° le pharynx ou arrière-bouche, — 3° l'œsophage,— [illegible], — 5° l'intestin.

Les dents et diverses glandes telles que le foie, le pancréas, les glandes salivaires peuvent être considérées comme les annexes de cet appareil

Les aliments, avant de servir à l'entretien de la vie, doivent subir un certain nombre d'actes dont les uns peuvent être regardés comme accessoires, les autres comme essentiels; les premiers sont mécaniques et consistent dans :

1° La préhension, — 2° la mastication, — 3° l'insalivation, — 4° la déglutition, — 5° l'expulsion des fèces.

Les seconds sont de nature chimique et consistent dans :

1° La digestion buccale, — 2° la digestion stomacale, — 3° la digestion intestinale.

7. **Préhension**. — La préhension des aliments peut s'effectuer de diverses manières : tantôt à l'aide des lèvres et des dents seulement (carnassiers, ruminants, etc.); tantôt à l'aide des mains (hommes, singes, etc.); tantôt à l'aide de la langue (tamanoir, caméléon); tantôt à l'aide d'une trompe constituée par le prolongement du nez (éléphant); chez d'autres, les aliments sont saisis par des palpes qui entourent la bouche (insectes) ou par des bras ou tentacules (mollusques céphalopodes, polypes, etc.).

Quoi qu'il en soit, les aliments sont ainsi portés dans la bouche. Chez l'homme et les autres mammifères, cette cavité a une forme ovalaire et est limitée en avant par les lèvres, sur les côtés par les joues et les mâ-

choires, en haut par le palais, en bas par la langue, en arrière par le voile du palais qui la sépare de l'arrière-bouche ou pharynx. Les aliments liquides ne séjournent pas dans la bouche, mais les aliments solides doivent, dans la plupart des cas, y être broyés et mêlés à la salive. Chez les oiseaux, les matières nutritives ne font que passer dans le bec, qui ne les divise que très-imparfaitement. Au contraire, chez les mammifères, ainsi que dans beaucoup d'autres groupes, les dents jouent un rôle important.

8. **Mastication. Dents.** — La division mécanique des aliments se fait surtout au moyen des dents qui, le plus ordinairement, arment le bord préhensile des mâchoires. Ces petits corps sont disposés de façon à pouvoir agir les uns sur les autres, à la manière de pinces, ou des branches de ciseaux, et à pouvoir ainsi broyer ou couper les corps que les mouvements des joues et de la langue ramènent sans cesse entre eux. Les dents se développent dans l'épaisseur des os de la mâchoire et dans l'intérieur d'un petit sac appelé capsule dentaire *a* (*fig.* 1); elles naissent sur un mamelon vasculaire ou bulbe *b*, qui adhère par sa base aux parties molles et communique directement avec les vaisseaux sanguins des régions voisines. Ce bulbe, garni d'une tunique propre, présente la forme de la dent et reçoit [illegible] de nombreux vaisseaux sanguins *c*. La pulpe dentaire, c'est-à-dire ce qui deviendra la dentine ou ivoire *d*, se développe à sa surface. Enfin des sels calcaires viennent durcir ces parties, les vaisseaux disparaissent alors, et le bourgeon dentaire est divisé en deux portions, l'une centrale et vasculaire, l'autre périphérique et non vasculaire.

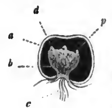


Fig. 1.

La dent se trouve donc fixée dans une cavité osseuse nommée alvéole; la partie ainsi contenue porte le nom de ***racine;*** elle peut présenter une ou plusieurs pointes; la partie extérieure prend le nom de ***couronne.*** Enfin, entre la racine et la couronne on remarque souvent un petit étranglement que l'on nomme le ***collet.***

Les dents sont constituées par divers tissus qui ont pour éléments principaux une matière organique et des sels calcaires (phosphate et carbonate de chaux, fluorure de calcium). Ces tissus peuvent varier beaucoup. Le corps de la dent est formé par une substance désignée sous le nom d'***ivoire*** ou dentine. Cette matière est creusée d'une foule de petits canalicules parallèles entre eux et dirigés du centre à la périphérie de la dent. A la surface de la dentine se dépose ordinairement une autre matière appelée ***émail;*** elle se compose de petits prismes accolés les uns aux autres et ressemblant à des colonnes de basalte; sa richesse en sels calcaires et sa dureté sont beaucoup plus grandes que celles de la dentine. Elle revêt la couronne de la dent; la racine n'en offre jamais. Enfin,

vers l'extrémité de cette racine ou même autour de la couronne, chez quelques animaux tels que les ruminants, on voit se développer une troisième matière analogue au tissu osseux, creusée de cavités étoilées et qui porte le nom de ***substance corticale*** ou ***cément***.

Les dents peuvent manquer; quelques poissons en sont privés. Parmi les batraciens et les reptiles, les crapauds et les tortues n'en présentent pas. Il en est de même chez quelques mammifères, tels que les fourmiliers, les pangolins, les échidnés et les baleines. Beaucoup d'animaux avalent leurs aliments sans les mâcher; aussi leurs dents sont-elles disposées de façon seulement à saisir et à retenir la proie qui tend à s'échapper. Elles ont alors toutes la même forme et ressemblent à des cônes simples ou recourbés. Les reptiles et les poissons présentent ordinairement ce mode d'organisation. Dans ce cas, on remarque souvent que presque tous les os qui circonscrivent la cavité buccale portent des dents. Mais chez les animaux qui, tout en se nourrissant d'une proie vivante, ont besoin de déchirer les chairs et de broyer les os avant de les avaler, on trouve dans le système dentaire une complication beaucoup plus grande. Il y a division du travail physiologique, et certaines dents servent exclusivement à retenir la proie; d'autres à couper les chairs, et d'autres à les broyer et à les diviser. C'est ainsi que chez les carnivores il existe :

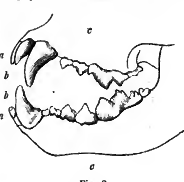


Fig. 2.

1° Des incisives *a* (*fig.* 2) terminées par un bord mince et tranchant;

2° Des canines *b* placées de chaque côté, en arrière des précédentes, en général longues et pointues, servant à s'implanter dans les chairs et à les déchirer.

3° Des molaires ou mâchelières *c*, situées en arrière des canines, destinées à broyer et à hacher les aliments, et présentant ordinairement plusieurs racines.

Chez certains carnassiers, tels que les chats, les différences entre ces trois sortes de dents sont très-tranchées; mais chez d'autres animaux elles peuvent s'effacer, et les dents peuvent se ressembler beaucoup plus entre elles. C'est ainsi que chez l'homme la différence entre les incisives et les canines est très-peu marquée.

Le régime alimentaire suivi par les animaux coïncide en général avec des dispositions dentaires particulières.

Chez ceux qui se nourrissent de viande, les canines sont longues et pointues; les molaires tranchantes à la manière de ciseaux (*fig.* 2).

Chez ceux qui mangent des insectes, les molaires sont hérissées de petites pointes s'engrenant les unes dans les autres (hérissons).

Chez ceux qui se nourrissent d'herbes, la couronne des molaires est large, plate; sa surface est striée; les canines manquent le plus souvent.

Chez les animaux dont le régime est frugivore, la couronne de ces dents est large et garnie de mamelons arrondis qui se remarquent chez l'homme, le singe, le sanglier, etc.

Chez les animaux destinés à ronger des corps durs, tels que des racines, des écorces, les enveloppes de certains fruits, les incisives prennent un grand développement, tandis que les canines manquent complétement (rat, castor).

Les dents qui se montrent dans les premiers temps de la vie sont ordinairement destinées à tomber pour être remplacées par d'autres. On désigne les premières sous le nom de ***dents de lait*** ou de première dentition, et les secondes sous le nom de ***dents de remplacement*** ou de séconde dentition. Chez l'homme les dents de lait apparaissent vers la fin de la première année; elles sont au nombre de 20.

4 incisives à chaque mâchoire (*fig.* 3), — 2 canines, — 4 molaires.

Vers l'âge de 7 ans la seconde dentition commence son évolution. Quand elle est achevée, on trouve 32 dents, car au lieu de 2 molaires

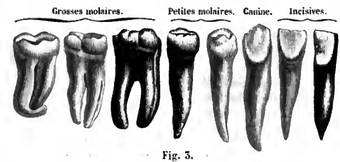


Fig. 3.

il en existe 5 de chaque côté, ce qui porte leur nombre à 20. Les deux premières portent le nom de ***fausses molaires*** ou ***prémolaires;*** les autres celui de ***vraies molaires*** (*fig.* 3).

Chez beaucoup de poissons la production des dents paraît illimitée, et derrière chacun de ces corps il en existe plusieurs en voie de développement destinées à se remplacer successivement. C'est ainsi que chez les requins on voit 4 ou 5 rangées de dents dont les dernières sont couchées contre la membrane muqueuse de la bouche.

Chez l'homme et la plupart des animaux la dent arrivée à son développement cesse de croître et s'use de plus en plus. Chez d'autres, tels que les rongeurs, on remarque que les incisives s'accroissent pendant

toute la vie; ce résultat est dû à ce que la communication entre le bulbe et le système circulatoire a été conservée, tandis que dans l'autre cas les vaisseaux sanguins du bulbe s'étaient atrophiés, et par conséquent le travail nutritif ne pouvait se continuer dans la dent.

Chez les vertébrés les plus élevés en organisation, la mâchoire inférieure seule est mobile, la mâchoire supérieure étant complétement fixée au crâne. Cependant, chez les reptiles et les poissons, la mâchoire supérieure peut exécuter différents mouvements.

Les muscles destinés à relever la mâchoire inférieure sont très-puissants; ils s'attachent d'un côté à ces os et d'un autre côté aux parties latérales de la tête, au-devant des oreilles; les principaux sont ordinairement au nombre de deux, le *masseter* et le *temporal*.

Leur force est considérable chez certains animaux tels que le lion, où leur volume est énorme. Les muscles destinés à abaisser la mâchoire sont au contraire très-faibles; en effet, ils n'ont aucune résistance à vaincre et le poids seul de cet os tend à l'abaisser; ils se fixent d'une part sur la mâchoire, d'autre part sur l'hyoïde et par l'intermédiaire de cet os sur le sternum.

9. **Insalivation.** — A mesure que la mastication s'effectue, les aliments ainsi divisés par l'action des dents se mêlent à la salive.

La *salive* est un liquide aqueux contenant des sels et une matière organique particulière, la ptyaline, sécrétée par des glandules logées dans l'épaisseur des parois de la cavité buccale et par des glandes situées aux environs de la bouche. Chez l'homme il en existe trois paires, qui en raison de leur position, ont reçu le nom de *glandes parotides*, de *glandes sous-maxillaires* et de *glandes sublinguales*.

Les parotides sont les plus volumineuses, elles sont placées au-devant du conduit auditif, en arrière de la branche montante de la mâchoire; le produit de leur sécrétion est versé dans la bouche par un conduit appelé *canal de Sténon*, qui s'ouvre à la face interne de la joue, vis-à-vis de la deuxième grosse molaire supérieure.

Les glandes sous-maxillaires (*fig.* 4) moins grosses que les précédentes, sont situées sous le plancher de la bouche en dedans de l'angle de la mâchoire. Leur conduit, appelé *canal de Warton* s'ouvre sur le côté du frein de la langue.

Les glandes sublinguales (*fig.* 4) moins développées que les précédentes, sont situées également sous le plancher de la bouche de chaque côté du frein de la langue. Elles donnent naissance à un assez grand nombre de conduits excréteurs.

La salive fournie par ces différentes glandes ne jouit pas des mêmes propriétés. Comme nous le verrons plus loin, celle des glandes parotides est très-aqueuse, celle des sous-maxillaires très-gluante.

Les glandes salivaires manquent chez certains animaux, on ne les

rencontre pas chez les poissons qui, vivant dans l'eau, ne pourraient utiliser leur salive pour les besoins de la digestion. Chez les batraciens l'appareil salivaire est rudimentaire. Il en est de même chez les reptiles. Chez quelques-uns de ces animaux il se complique davantage et est détourné de ses fonctions pour sécréter une matière toxique et constituer les glandes à venin.

Chez les mammifères supérieurs la quantité de salive qui arrive dans la bouche est très-considérable, surtout pendant le travail masticatoire; elle imbibe les aliments, en dissout quelques-uns et facilite le glissement des corps durs ou rugueux.

10. Déglutition. — Lorsque les matières alimentaires ont été suffisamment mâchés par les mouvements de la langue et des joues, elles se réunissent en une petite pelote que l'on désigne sous le nom de *bol alimentaire*. C'est dans cet état qu'elles passent dans le pharynx ou arrière-bouche. Nous avons déjà dit que chez l'homme et les mammifères la cavité buccale était séparée de l'arrière-bouche par un repli membraneux nommé voile du palais (*fig.* 4); l'ouverture qui permet la communication porte le nom d'isthme du gosier.

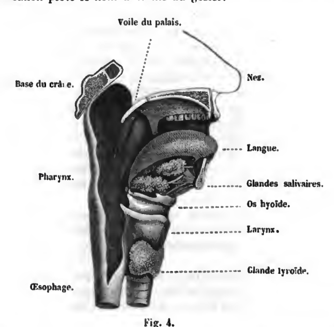


Fig. 4.

Le pharynx a souvent été comparé à un carrefour, parce que les voies aériennes s'y rencontrent et s'y croisent avec les voies digestives. En effet, à la partie supérieure il communique avec les fosses nasales par les ar-

rières-narines, en avant avec la bouche, en bas et en arrière avec l'œsophage, en bas et en avant avec la trachée-artère par une ouverture appelée glotte.

11. ***Mécanisme de la déglutition.*** — Le bol alimentaire doit traverser le pharynx pour se rendre dans l'œsophage sans tomber dans la trachée et sans remonter dans les fosses nasales. Ce résultat est obtenu à l'aide d'un ensemble de mouvements qui s'exécutent tout naturellement sans que l'individu en ait conscience : le voile du palais se relève et se place devant les arrière-narines, qui se trouvent ainsi fermées; la glotte s'élève et vient se placer sous la base de la langue pendant qu'une petite soupape, située à l'entrée de la glotte et nommée ***épiglotte*** s'abaisse et ferme cette ouverture. De cette façon l'entrée de l'œsophage reste seule béante

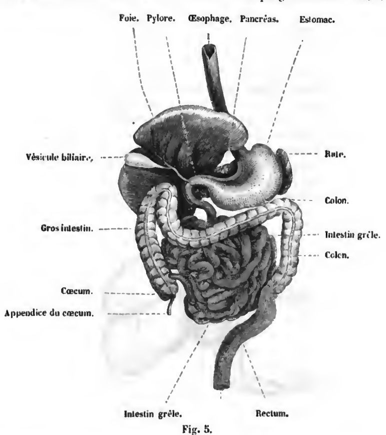


Fig. 5.

et le bol alimentaire, pressé et dirigé par la contraction des fibres musculaires du pharynx traverse rapidement ce conduit.

Lorsque cet ensemble de mouvements ne s'effectue pas d'une façon convenable et *qu'on avale de travers*, c'est parce que quelques gouttes de liquide, ou quelques parcelles de matières solides pénètrent dans la trachée, et déterminent de violents accès de toux et de suffocation.

12. *Œsophage.* — L'*œsophage* (*fig.* 5), dans lequel arrivent ensuite les aliments, est un long tube membraneux qui, logé d'abord derrière la trachée, passe ensuite derrière le cœur et les poumons, traverse le muscle diaphragme et débouche dans l'estomac. Ses parois sont revêtues de deux plans de fibres musculaires, l'un disposé longitudinalement, l'autre circulairement. Le bol alimentaire poussé peu à peu par la contraction successive des fibres de ce long tube, arrive dans l'estomac, où il *ne tombe* pas par le seul fait de la pesanteur, comme on l'a cru longtemps.

13. *Estomac.* — L'*estomac*, qui, chez l'homme, forme une poche simple, se divise souvent en un certain nombre de compartiments.

Chez l'homme cet organe est logé dans l'abdomen, au-dessous du diaphragme; il est dirigé transversalement de gauche, à droite, et présente deux ouvertures, l'une située à gauche communiquant avec l'œsophage et nommée *cardia*, l'autre débouchant dans l'intestin, nommée *pylore*, et placée à droite. Les parois de l'estomac sont garnies de fibres musculaires formant plusieurs couches distinctes. La membrane muqueuse, qui le revêt à l'intérieur, est criblée de petites ouvertures, communiquant avec des glandules nommées follicules gastriques et chargées de sécréter un liquide acide nommé suc gastrique, dont l'action est des plus importantes dans le travail digestif, comme nous le verrons plus tard.

Chez les ruminants, l'estomac présente une beaucoup plus grande complication et se divise en quatre poches, désignées sous les noms de *panse*, de *bonnet*, de *feuillet* et de *caillette* (*fig.* 6 et 7).

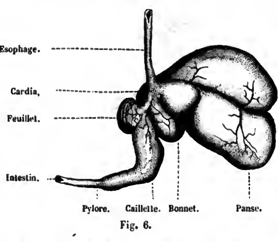


Fig. 6.

La panse présente un très-grand développement et sert de magasin pour l'herbe et le fourrage que l'animal vient de manger. Le bonnet communique largement avec la panse; le feuillet dépend de la caillette. C'est dans ce dernier estomac que se

dirigent les aliments que l'animal a ruminés. Les animaux qui présentent ce mode d'organisation commencent par broyer incomplétement les végétaux qu'ils mangent et qui se rendent dans la panse. Au bout de quelques heures, ce réservoir se contracte et force les matières qu'il contient à remonter dans la bouche sous forme de petites pelotes qui sont alors complétement triturées, mêlées à la salive, et descendent dans le feuillet et dans la caillette, sans s'arrêter dans la panse. Ce phénomène est dû au mode de terminaison de l'œsophage; en effet, ce conduit s'ouvre dans l'estomac par une sorte de gouttière qui se prolonge jusqu'au feuillet; lorsque des matières solides et incomplètement mâchés arrivent dans l'estomac, elles dilatent l'ouverture laissée entre les lèvres de cette gouttière et tombent dans la panse; si elles sont, au contraire, plus liquides et mieux divisées elles coulent sans écarter les lèvres et tombent dans le feuillet.

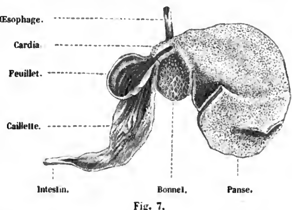


Fig. 7.

Chez les oiseaux, outre l'estomac, on voit un autre réservoir à parois très-musculeuses et destiné à broyer les grains et les aliments durs. Il porte le nom de ***gésier***. Chez quelques-uns on voit aussi, à la partie inférieure du cou, une poche servant de réservoir aux matières alimentaires et désignée sous le nom de ***jabot***.

14. *Intestins.* — L'***intestin***, qui fait suite à l'estomac, se présente sous la forme d'un long tube membraneux et reployé sur lui-même. Sa longueur varie suivant les animaux; chez ceux qui se nourrissent de chair, il est plus court que chez ceux qui mangent de l'herbe; c'est ainsi que chez le lion il n'a que trois fois la longueur du corps, tandis que chez le mouton, il a vingt-huit fois cette longueur, et que chez l'homme, dont le régime est intermédiaire, sa longueur ne dépasse pas sept fois celle du corps. Il est logé dans l'abdomen, où il est entouré et retenu par les replis d'une membrane séreuse fine et transparente appelée ***péritoine;*** ses parois sont revêtues de fibres musculaires, qui par leur contraction font cheminer les matières contenues dans son intérieur.

Le tube intestinal se divise en deux parties distinctes, l'***intestin grêle*** et le ***gros intestin***.

L'intestin grêle, ainsi nommé à cause de son petit calibre, fait suite à l'estomac; il a été subdivisé en trois parties : 1° le ***duodénum;*** 2° le ***jéjunum*** et l'***iléon***. Mais ces divisions sont complétement arbitraires. La membrane muqueuse qui tapisse les parois de l'intestin grêle est hérissée d'une foule de petits prolongements coniques désignés sous le nom de ***villosités***, et entre ces dernières on voit de petits follicules servant à sécréter un liquide particulier, que l'on a appelé suc intestinal. Enfin il existe un certain nombre de replis transversaux destinés à augmenter la surface intestinale absorbante et que l'on nomme ***valvules conniventes***.

Deux glandes, le foie et le pancréas versent leurs produits dans le duodénum.

15. ***Foie***. — Le ***foie*** est une glande volumineuse, d'un tissu rouge foncé et granuleux. Il est situé dans l'abdomen au-dessous du diaphragme qui le sépare des poumons. Chez la plupart des vertébrés, on voit à la face inférieure de cette glande, un petit réservoir, appelé ***vésicule du fiel***, dans lequel s'accumulent les produits de la sécrétion du foie, connus sous le nom de bile. Ce liquide est versé dans le duodénum, à peu de distance du pylore par le ***canal cholédoque***. La bile présente une couleur verdâtre, une saveur amère qui lui a fait donner le nom vulgaire d'***amer de bœuf;*** sa consistance est filante et sa réaction alcaline.

16. ***Pancréas***. — Le ***pancréas*** était autrefois nommé glande salivaire abdominale, parce que sa texture rappelle jusqu'à un certain point celle des parotides. Il est situé derrière l'estomac au-devant de la colonne vertébrale. Il sécrète un liquide aqueux appelé suc pancréatique et qui est versé dans le duodénum par le ***canal de Wirsung;*** quelquefois ce conduit se confond avec le canal cholédoque, mais le plus souvent il en est distinct.

17. ***Gros intestin***. — Le gros intestin fait suite à l'intestin grêle et s'en distingue par son calibre plus considérable et par sa forme dilatée et boursouflée; il en est séparé par un repli membraneux qui permet le passage des matières de haut en bas, ou d'arrière en avant, mais les empêche de revenir sur leurs pas; ce repli porte le nom de ***valvule iléo-cæcale*** ou des apothicaires. On a distingué dans le gros intestin trois parties, le ***cæcum***, le ***colon*** et le ***rectum***.

Le cæcum est remarquable par l'existence d'un appendice étroit en forme de cul de sac, désigné sous le nom d'appendice cæcal, qui s'ouvre dans cette partie du gros intestin. Le colon se replie plusieurs fois et se continue avec le rectum; ce dernier se termine tantôt par une ouverture spéciale, connue sous le nom d'anus, comme chez la plupart des mammifères; tantôt il s'ouvre dans une chambre appelée ***cloaque*** et dans laquelle débouchent aussi les organes urinaires et reproducteurs, ainsi qu'on peut le voir chez les oiseaux et chez quelques mammifères tels que les monotrêmes.

PHYSIOLOGIE DE LA DIGESTION.

Nous allons maintenant examiner les phénomènes essentiels de la digestion, c'est-à-dire les phénomènes chimiques par lesquels les matières alimentaires prises au dehors deviennent solubles et absorbables.

18. **Nature des aliments.** — L'aliment est une substance destinée à réparer les pertes de l'économie et à entretenir les tissus. — L'eau et les matières minérales doivent donc être rangées dans cette classe; mais elles doivent y occuper une place spéciale. Les autres aliments sont puisés dans le règne organique, soit végétal, soit animal, et ils doivent se diviser en trois groupes : les aliments sucrés ou amylacés, les aliments gras et les aliments azotés. Les deux premiers ne contiennent que du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène; les autres renferment aussi de l'azote. — Les aliments gras et sucrés ou *ternaires* sont surtout destinés à la combustion respiratoire; les aliments azotés ou *quaternaires*, appelés aussi aliments plastiques, servent principalement à la réparation des tissus. Ils sont indispensables à l'entretien de la vie; et un animal qui en est privé et auquel on continue à donner des aliments ternaires ne tarde pas à mourir de faim.

En général, les matières alimentaires ne peuvent être absorbées telles qu'elles sont ingérées; il faut qu'elles subissent une série de transformations sous l'influence des sucs digestifs : c'est ainsi que

1° *La salive agit sur les matières amylacées;*

2° *Le suc gastrique sur les matières azotées;*

3° *Le suc pancréatique et la bile sur les matières grasses.*

19. **Action de la salive.** — Si l'on mâche pendant quelque temps de l'amidon, on ne tarde pas à remarquer que la saveur de ce corps se modifie et devient sucrée; si l'on cherche quelles sont les transformations qu'il a subies, on verra qu'il s'est formé une certaine quantité de sucre. — Cette transformation de l'amidon et des fécules en sucre est due à la *ptyaline*, principe particulier de la salive, appelée aussi diastase animale, à cause de sa ressemblance avec la diastase qui se produit dans les graines en voie de germination, et qui possède les mêmes propriétés. Mais, chose remarquable, ce n'est que la salive mixte, c'est-à-dire le mélange de la sécrétion des glandes salivaires et des glandules de la bouche, qui peut produire cet effet. Cette action est faible et ne contribue que peu au travail digestif. — La salive des glandes parotides prise à part ne sert qu'à humecter les aliments : aussi est-elle très-liquide. La salive des glandes sublinguales et sous-maxillaires est très-visqueuse et facilite le glissement des corps durs.

20. **Action du suc gastrique.** — Réaumur et l'abbé Spallanzani, célèbre physiologiste de Modène, firent connaître, les premiers, l'action du suc gastrique. Avant eux on croyait que les aliments étaient simplement

broyés dans l'estomac. Réaumur démontra que de la viande renfermée dans de petits tubes rigides percés de trous était aussi bien digérée que dans les circonstances ordinaires. Spallanzani fit plus : à l'aide de petites éponges, attachées à un fil et qu'il fit avaler à des oiseaux, il alla puiser du suc gastrique dans l'estomac. Il put ensuite, à l'aide de ce liquide et en dehors du corps de l'animal, faire des *digestions artificielles* de viande.

L'action dissolvante du suc gastrique est due à un principe particulier nommé *pepsine*, qui, combiné à un acide tel que l'acide chlorhydrique ou lactique, jouit de la propriété de dissoudre l'albumine, la fibrine, le gluten et les autres matières azotées, et de transformer ces matières en une masse semi-fluide appelée chyme.

21. **Action du suc pancréatique et de la bile.** — On croyait anciennement que la digestion des matières grasses était due exclusivement à la bile : mais, depuis, on a vu que l'on pouvait, dans certains cas, oblitérer le canal cholédoque et empêcher la bile d'arriver dans l'intestin, sans pour cela entraver la digestion des graisses. — M. Cl. Bernard découvrit que le suc pancréatique jouit de la propriété d'émulsionner les matières grasses, c'est-à-dire de les diviser en particules d'une ténuité extrême, et de les dédoubler en acides gras et en glycérine; il vit que l'absorption des graisses se fait dans l'intestin à partir du point où le canal de Wirsung y verse le suc pancréatique, et que si l'on détruit le pancréas, les animaux ne tardent pas à mourir dans un état d'amaigrissement extrême. Le suc pancréatique agit aussi et d'une manière très-active sur les matières amylacées et les transforme en glucose.

La digestion des matières grasses est donc due à l'action de la bile aussi bien qu'à celle du suc pancréatique. Le premier de ces liquides non-seulement peut en dissoudre une certaine proportion, mais encore, en mouillant les parois de l'intestin, il permet aux matières huileuses de les traverser plus facilement.

22. Le *suc intestinal*, c'est-à-dire celui que sécrètent les follicules contenues dans les parois de l'intestin grêle, agit aussi dans le travail digestif; il vient en aide au suc gastrique et dissout les matières azotées qui ont échappé à l'action de ce dernier liquide.

APPAREIL DIGESTIF DES ANIMAUX INFÉRIEURS.

L'appareil digestif peut être beaucoup plus simple et n'être constitué que par un sac s'ouvrant pour recevoir les aliments, se fermant pendant la digestion et se rouvrant pour l'élimination du résidu que les sucs digestifs n'ont pu attaquer.

23. **Zoophytes.** — Chez les êtres les plus inférieurs nous trouvons ce mode d'organisation. Chez la plupart des polypes radiaires (zoophytes), le tube digestif ne se compose que d'une cavité occupant presque tout le

corps de l'animal, se terminant en cul-de-sac et ne communiquant avec l'extérieur que par un seul orifice remplissant tour à tour les fonctions d'une bouche et d'un anus. Un des exemples les plus curieux de cette disposition est fourni par les hydres d'eau douce, ou polypes à bras.

24. **Hydres.** — Chez ces petits animaux on voit à la partie antérieure du corps une ouverture entourée d'un certain nombre de bras que l'animal agite sans cesse pour saisir au passage les corpuscules qui flottent autour de lui et qui peuvent servir à sa nourriture. Cette ouverture *o* débouche dans une vaste cavité en forme de sac, dans lequel s'effectue le travail digestif (*fig.* 8). Tremblay a vu que si l'on retourne ces petits êtres comme un doigt de gant, de sorte que la surface digestive devienne extérieure, et que ce qui était primitivement la peau, forme les parois de la cavité stomacale, l'animal ne meurt pas et la digestion continue à s'effectuer avec autant de facilité qu'auparavant. Cette expérience curieuse prouve que chez ces êtres inférieurs toutes les parties de l'organisme jouissent des mêmes propriétés digestives et que les fonctions ne sont pas encore localisées dans des appareils spéciaux.



Fig. 8.

25. **Méduses.** — Chez les acalèphes ou méduses, la poche stomacale se complique par l'adjonction de loges ou de canaux trop étroits pour livrer passage aux aliments, et dans lesquels les matières élaborées peuvent seules pénétrer; il y a dans ce cas une sorte de circulation des principes devenus absorbables. Mais ici encore il n'existe qu'une seule ouverture pour l'introduction et la sortie des matières.

26. **Corail.** — Chez d'autres zoophytes, tels que le corail la portion stomacale tend à se séparer de plus en plus de la portion irrigatoire du système digestif; en effet, le sac destiné à recevoir les aliments est étranglé vers sa partie médiane, et au moyen de la contraction de fibres musculaires, peut même se fermer complétement, de façon que c'est dans cette première cavité que s'effectue la digestion et que la seconde ne sert qu'à recevoir les produits élaborés. Les parois de cette première cavité présentent de petites glandules destinées à sécréter un suc digestif.

27. **Oursins.** — Enfin, sans quitter l'embranchement des zoophytes, nous trouvons un perfectionnement de plus. Il consiste dans l'adjonction d'un orifice servant à l'expulsion du résidu qui n'a pu être utilisé dans la

digestion. C'est ainsi que chez les oursins, ou châtaignes de mer, si communs sur nos côtes, l'appareil digestif peut prendre le nom de tube, car il traverse le corps de l'animal.

Chez les mollusques et les articulés, l'appareil digestif présente toujours cette forme tubulaire, et offre deux orifices, l'un destiné à l'introduction des aliments, l'autre à l'expulsion des fèces. Ce conduit présente ordinairement une ou plusieurs dilatations, dont la principale constitue l'estomac.

ABSORPTION.

Absorption en général. — Absorption par les vaisseaux chilifères et par les veines.

28. **Absorption en général.** — *L'absorption est une fonction par laquelle les animaux font pénétrer dans leur organisme les liquides ou les gaz qui sont en contact avec eux, ainsi que les principes élaborés pendant la digestion.*

Lorsque les sucs digestifs ont agi sur les aliments et les ont transformés en une masse pulpeuse et demi-fluide appelée chyle, alors commencent les phénomènes de l'absorption destinés à faire pénétrer dans la masse du sang les matières élaborées pendant la digestion.

Tous les tissus vivants sont plus ou moins perméables, c'est-à-dire que tous laissent passer les liquides à travers leur substance après la mort aussi bien que pendant la vie. Ce fait est connu pour ainsi dire de tout temps. Les parois des vaisseaux sanguins aussi bien que celles des vaisseaux chylifères ou lymphatiques sont plus ou moins perméables et s'imbibent des liquides qui baignent leur surface. Il ne suffit cependant pas que ces parois soient perméables, il faut encore, pour que les liquides les traversent, qu'ils soient poussés dans les interstices des tissus par une force motrice quelconque.

L'influence de la capillarité doit entrer en première ligne dans l'explication de ce phénomène. On sait en effet que l'eau et d'autres liquides s'élèvent dans les tubes étroits dits capillaires, malgré l'influence de la pesanteur, qui tend à les faire tomber. On peut regarder les tissus organiques de l'économie comme criblés de petites ouvertures que nous ne pouvons voir à l'aide de nos moyens d'investigation ordinaires, et en communication les unes avec les autres. On peut donc considérer ces espèces de petits canalicules comme autant de tubes capillaires dont les parois tendent à attirer les liquides Lorsque cette première puissance a ainsi agi, les forces osmotiques entrent en jeu.

29. **Phénomènes d'osmose**. — Les phénomènes d'*osmose*, découverts par Dutrochet, jouent en effet un grand rôle dans la marche des liquides de l'organisme. — On remarque que si deux liquides de densités différentes se trouvent en présence, séparés seulement par une membrane

animale ou végétale, ils tendent à se mêler, des courants s'établissent à travers la membrane; en général ceux qui vont du liquide le moins dense vers le plus dense sont plus rapides que les autres. De sorte que le liquide dont la densité est la plus forte augmente de volume aux dépens du liquide dont la densité est moindre.

Si par exemple on place une dissolution de sucre ou de gomme dans l'intérieur d'une petite vessie à laquelle est fixé un long tube, et si l'on plonge ce petit appareil dans de l'eau pure, cette dernière traversera plus facilement les parois du sac que ne pourra le faire la dissolution du sucre; le liquide s'accumulera alors dans l'intérieur de l'appareil et s'élèvera dans le tube. En même temps une certaine proportion de la solution sucrée sortira de la vessie pour aller se mêler en faible proportion à l'eau extérieure.

Ces phénomènes considérés dans leur ensemble prennent le nom d'*osmose*. On appelle *endosmose* le courant du liquide plus dense vers le liquide moins dense, et *exosmose* le courant en sens contraire.

Chez les animaux ainsi que chez les végétaux les actions osmotiques s'exercent à chaque instant. En effet, la plupart des sucs élaborés que l'on rencontre dans les tissus vivants peuvent agir sur les liquides environnants, comme la dissolution sucrée agissait sur l'eau; et une fois que ces liquides ont pénétré dans les vaisseaux, ils sont entraînés par le torrent circulatoire et se répandent dans l'organisme.

L'absorption chez l'homme se fait de deux manières : par les veines et par les *vaisseaux lymphatiques*. Ces derniers sont répandus dans tout le corps; ils naissent dans l'épaisseur des organes, se réunissent en branches, puis en troncs, et vont se jeter dans les veines. Dans leur intérieur se trouvent des replis membraneux ou valvules servant à régler le cours de la lymphe, car ils peuvent s'ouvrir dans le sens du cours de ce liquide, mais se ferment quand ils sont poussés en sens contraire.

Les vaisseaux lymphatiques qui naissent dans l'intestin et qui sont destinés à l'absorption des matières digérées, portent le nom de vaisseaux chylifères.

30. **Absorption par les vaisseaux chylifères.**— Si l'on ouvre l'abdomen d'un animal en voie de digestion, on voit un grand nombre de petits vaisseaux blanchâtres ramper à la surface du mésentère de l'intestin grêle. Ces vaisseaux naissent dans l'intérieur des villosités intestinales, se réunissent en branches, puis en troncs, traversent de petites masses formées par le pelotonnement de ces vaisseaux et appelées ganglions, puis vont déboucher dans un canal qui remonte dans l'abdomen et le thorax, le long de la colonne vertébrale, et va s'ouvrir dans la veine sous-clavière gauche. Ce tronc est appelé *canal thoracique*.

Quand l'animal est à jeun, ces petits vaisseaux connus des anatomistes sous le nom de chylifères ou lactés, ne s'aperçoivent pas; leurs parois

sont transparentes et se confondent avec les lames du péritoine entre lesquelles ils rampent. L'aspect lactescent qu'ils présentent au moment de la digestion est dû seulement à la présence du chyle dans leur intérieur.

Le *chyle* offre en général une couleur blanche et opaline, due à la présence de particules graisseuses qui s'y trouvent suspendues; il est puisé dans l'intestin grêle par les villosités, puis passe dans les vaisseaux chylifères, traverse les ganglions pour se rendre dans le canal thoracique, qui le conduit jusqu'au système circulatoire. Dans ce trajet, la constitution du chyle se modifie considérablement. Au sortir de l'intestin il contient une quantité notable d'albumine; mais à mesure qu'il chemine dans les vaisseaux, il se charge de fibrine; de sorte que lorsqu'il est extrait du corps, il se coagule comme du sang.

31. **Absorption par les veines.** — La plupart des liquides qui arrivent dans l'estomac sont absorbés directement par les veines qui serpentent dans l'épaisseur des parois de ce viscère et des intestins grêles. Chez quelques animaux c'est même la seule voie par où se fait l'absorption. On a cru longtemps qu'elle devait être la seule; puis quand on eut découvert les vaisseaux lymphatiques, on tomba dans l'excès contraire et on nia complétement l'action absorbante des vaisseaux sanguins. Un physiologiste célèbre, Magendie, démontra que les vaisseaux sanguins étaient pourvus de parois perméables et qu'ils pouvaient servir au transport des matières liquides du dehors dans l'économie. Pour cela il coupa toutes les parties molles, ainsi que les os de la jambe d'un chien, ne laissant cette partie en communication avec le reste du corps que par l'artère et la veine qu'il avait ménagées à dessein; de cette manière il avait détruit tous les vaisseaux lymphatiques; il injecta alors sous la peau de la jambe ainsi préparée de l'extrait de noix vomique; l'absorption de cette substance toxique se fit presque instantanément et l'animal mourut; en liant les veines de la jambe, il constata que l'on pouvait retarder presque indéfiniment l'empoisonnement, mais qu'aussitôt après que la ligature était défaite, les effets de la noix vomique se faisaient sentir. L'expérience était concluante, cependant on lui objecta que le long des parois des veines et des artères de la jambe, conservées dans cette opération, il pouvait y avoir encore quelques lymphatiques. Pour répondre à cette objection, Magendie remplaça la veine et l'artère par des tubes de verre, dans lesquels circulait le sang et qui établissaient la communication entre le corps et la jambe de l'animal en expérience. De cette manière l'absorption du poison déposé dans le pied ne pouvait être attribuée qu'aux veines.

DU SANG.

32. **Composition du sang.** — Le sang peut être appelé le liquide nourricier de l'économie. En effet, c'est lui qui entretient la

vie des organes et qui fournit les matériaux nécessaires à leur nutrition.

Chez l'homme et les animaux supérieurs, le sang présente une couleur rouge intense; c'est un liquide fluide pendant la vie, et qui, après la mort, se coagule, c'est-à-dire se prend en une masse solide que l'on nomme le *caillot*, tandis qu'il reste un liquide jaunâtre que l'on appelle le *sérum*.

Le caillot se compose des globules du sang emprisonnés dans les mailles de la fibrine coagulée.

La *fibrine* est une substance albuminoïde qui, pendant la vie, paraît être en dissolution dans le sang, mais aussitôt après la mort, au bout de quelques minutes, devient insoluble, se prend en masse et retient les globules qui se trouvent en suspension dans le sang. D'abord le caillot est peu dense et très-chargé de sérum; puis peu à peu les mailles de la fibrine se resserrent et expriment le liquide qu'elles contenaient; aussi, si l'on veut empêcher la coagulation du sang, il faut enlever la fibrine Cette opération ne présente aucune difficulté; il suffit pour cela de battre le sang au sortir de la veine, avec des baguettes; la fibrine s'y attache, et la formation du caillot devient impossible. La fibrine que l'on obtient ainsi se présente sous la forme de filaments blancs et élastiques. On peut encore se procurer cette substance d'une autre manière. Si l'on jette du sang sur un filtre, après y avoir mêlé du sucre ou du sel pour retarder la coagulation, les globules ne pourront pas passer à travers les pores du papier, et lorsque la fibrine se coagulera, elle formera dans le liquide filtré un caillot blanc ou jaunâtre.

33. Globules du sang. — Les globules du sang avaient été entrevus en 1665, par Malpighi, qui les avait pris pour des gouttelettes de graisse. Un autre micrographe, Leuwenhoeck, reprit cette étude et reconnut leur véritable nature.



Fig. 9.

Fig. 10.

Ces globules, en général d'une petitesse extrême, varient de forme et de grandeur suivant les animaux. Chez les mammifères ils ont la forme d'un disque, et sont très-petits; chez l'homme (*fig.* 9), ils atteignent $\frac{1}{125}$ de millimètre; chez la chèvre, $\frac{1}{250}$ de millimètre; ils présentent la forme d'une lentille biconcave; aussi la dépression qu'ils offrent au centre a-t-elle été longtemps prise pour un noyau. Chez les oiseaux ***a*** (*fig.* 10), les batraciens ***b***, les reptiles et les poissons ***c***, les globules du sang sont elliptiques. Chez les oiseaux ils sont plus grands que chez les mammifères; enfin chez les poissons et les batraciens, leur taille augmente beaucoup. Ainsi, chez le Protée, batracien qui vit dans les lacs souterrains de la Carniole, ils atteignent $\frac{1}{17}$ de millimètre.

Chez tous ces animaux on trouve un noyau au centre du globule.

Il est une exception très-remarquable à noter, c'est que parmi les mammifères, qui ont d'ordinaire les globules du sang circulaires, la famille des caméliens, c'est-à-dire les chameaux et les lamas, présentent des globules elliptiques.

Il paraîtrait aussi que parmi les poissons, les globules du sang des lamproies seraient circulaires. Ces globules ont toujours les mêmes dimensions chez le même animal.

Indépendamment de ces corpuscules auxquels le sang doit sa couleur rouge on trouve aussi dans ce liquide de grands globules incolores appelés ***globules blancs*** et d'autres beaucoup plus petits nommés ***globulins***. Leur importance est d'ailleurs assez faible.

Le sérum du sang contient de l'albumine que l'on peut facilement faire coaguler par la chaleur, et des sels minéraux que l'on extrait par l'évaporation du liquide débarrassé de l'albumine.

Chez tous les vertébrés le sang est rouge et présente à peu près la même composition. (Chez l'amphioxus, cependant le sang est blanc.) Chez les invertébrés, dans la plupart des cas, le sang est incolore; lorsqu'il est coloré, il doit sa coloration, non pas aux globules, mais au liquide. Ces différences de teintes ne sont d'ailleurs d'aucune importance physiologique car dans des espèces d'annélides très-voisines on trouve du sang, tantôt vert, tantôt rouge, tantôt bleu, tantôt blanc.

34. **Propriétés physiologiques et usages du sang.** — Le sang est l'agent indispensable de l'activité vitale. Sans lui aucune fonction ne peut s'exécuter, et s'il vient à faire défaut, l'animal tombe dans un état de faiblesse extrême, puis meurt.

C'est ainsi que si l'on ouvre une artère, et que l'on laisse le sang s'écouler, l'animal s'affaiblit peu à peu, perd le sentiment et le mouvement, et si l'on n'arrête pas l'écoulement de ce liquide, la mort arrive par ***hémorraghie***, quand l'animal a perdu environ $\frac{1}{20}$ de son poids. Mais si après avoir oblitéré l'artère, on fait rentrer dans les vaisseaux, à l'aide d'une seringue, le sang qui vient de s'écouler, on verra l'animal se relever, et au bout de quelques instants, ses fonctions se rétabliront, comme si rien ne s'était passé. Cette expérience avait donné aux médecins du dix-septième siècle, la pensée de guérir les maladies par la ***transfusion***, c'est-à-dire en substituant au sang d'un malade, le sang d'un animal bien portant. Le plus souvent ils choisissaient du sang de bœuf ou de mouton, pour l'injecter dans les veines de l'homme, et toujours leurs expériences étaient suivies de la mort du patient. Enfin, un arrêt du parlement défendit ces expériences. Il y a près de trente ans, ce sujet a été repris, et l'on a vu que les expériences de transfusion pouvaient réussir, lorsque l'on employait le sang d'un animal de la même espèce que celui sur lequel on expérimentait; que, dans le cas contraire,

la mort était la conséquence infaillible de l'opération. On a constaté également que du sang privé de globules n'agissait pas, et que du sang dépouillé de fibrine, ranimait l'animal, mais ne le rétablissait jamais complétement.

Quand le sang, par une cause quelconque, ne peut plus se rendre dans un organe, cet organe, ne tarde pas à s'atrophier et à périr; si, pendant un instant seulement, le cerveau ne reçoit plus de sang, l'animal tombe en syncope.

Au contraire, lorsqu'un organe ou une partie quelconque du corps reçoit beaucoup de sang, quand la circulation y est rapide, cette partie prend un grand développement; c'est pour cette raison que l'exercice musculaire qui active la circulation a, en général, pour résultat l'augmentation de volume des membres qui en sont le siége.

Si l'on examine le sang dans les différentes parties du corps, on ne lui trouve pas partout le même aspect; tantôt il est d'un rouge vif, quelquefois, au contraire, il est noirâtre. Le premier porte le nom de sang artériel, le second celui de sang veineux. Les usages de ces deux sangs ne sont pas les mêmes dans l'économie. Ainsi le sang noir ne peut entretenir la vie des organes; si l'on fait arriver du sang noir au cerveau, l'animal tombe en léthargie. Le sang rouge, en agissant sur l'économie, devient noir. Celui-ci, en traversant les poumons, rede vient rouge. D'après ces résultats, on voit combien il est nécessaire que le sang circule dans l'organisme, et qu'après avoir été en contact avec les organe il puisse venir se revivifier dans les poumons.

Pour que la circulation puisse s'effectuer, il faut que le liquide nourricier soit contenu dans un système de cavités, et qu'il y soit mis en mouvement d'une manière quelconque.

CIRCULATION DU SANG.

Phénomènes généraux de la circulation. — Appareil circulatoire.— Cœur. — Artères. — Veines. — Appareil circulatoire dans les diverses classes du règne animal. — Mécanisme de la circulation.

35. Chez les animaux supérieurs, le système circulatoire arrive à un haut degré de perfection. Nous allons d'abord l'étudier dans sa plus grande complication, puis nous suivrons ses modifications dans les différents groupes du règne animal.

Chez les animaux supérieurs, la circulation se fait au moyen d'un organe d'impulsion, le *cœur*, et de vaisseaux, les *artères* et les *veines*.

Les *artères* servent à porter le sang du cœur dans l'épaisseur des organes.

Les *veines* rapportent le sang des organes au cœur.

Les artères se divisent à l'infini et se terminent par des ramuscules extrêmement déliés, désignés sous le nom de ***vaisseaux capillaires***, qui se continuent avec les premières ramifications des veines, de façon à former un cercle continu.

On appelle ***grande circulation*** celle qui se fait dans tout le corps, qui sert à la nutrition des tissus, et ***petite circulation*** celle qui se fait dans les poumons, et qui ne sert qu'à la respiration. Il y aura donc deux ordres de vaisseaux capillaires : l'un dans les poumons, l'autre dans l'épaisseur des organes.

36. **Cœur.** — Chez l'homme et chez les mammifères, le cœur (*fig.* 11 et 12) est logé dans le thorax, entre les poumons; sa forme a de l'analogie

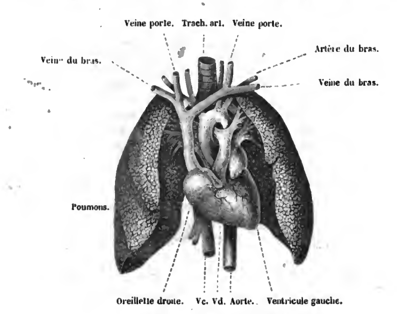


Fig. 11. — Cœur et poumons.

avec celle d'une poire; sa pointe regarde à gauche et en bas. Il est enveloppé dans une membrane séreuse, fine et transparente, nommée ***péricarde***, et est suspendu par les gros vaisseaux qui naissent à sa partie supérieure.

Le cœur chez les oiseaux et chez les mammifères est creusé à son intérieur de quatre cavités : deux supérieures, appelées ***oreillettes***, et deux inférieures ou ***ventricules***. Les oreillettes communiquent chacune avec le ventricule placé au-dessous; mais elles sont complétement séparées l'une de l'autre. Il en est de même pour les ventricules.

Les parois musculaires du cœur sont très-épaisses, surtout dans la partie inférieure qui constitue les ventricules. Chez la plupart des mammifères les fibres musculaires se continuent sans interruption d'un ventricule à l'autre, de façon à les unir d'une manière intime. Chez le dugong ils sont en grande partie séparés ainsi que les oreillettes, de sorte

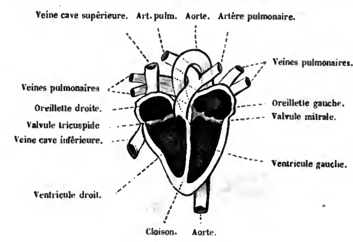


Fig. 12. — Coupe du cœur.

qu'il semble y avoir deux cœurs simples. Les parois du ventricule gauche sont plus puissantes que celles du ventricule droit. Car, comme nous le verrons, elles doivent déployer plus de force que celles de ce dernier ventricule. Ces cavités communiquent avec les oreillettes placées au-dessus par des orifices appelés ***auriculo-ventriculaires***, et fermés par des valvules (*fig.* 14). Les parois des oreillettes sont peu musculaires et presque membraneuses. En effet, elles doivent seulement envoyer le sang aux ventricules placés au-dessous d'elles; la force qu'elles ont à déployer est donc peu considérable.

37. **Veines et artères**. — Les vaisseaux sanguins sont, comme nous l'avons dit, de deux sortes :

1° Les artères qui, du cœur, portent le sang aux extrémités;

2° Les veines qui, des extrémités, rapportent le sang au cœur.

Les artères et les veines sont formées d'une membrane interne, mince et analogue aux membranes séreuses, et d'une membrane externe, formée de tissu cellulaire.

Dans les artères, entre ces deux tuniques, on en trouve une troisième d'un tissu jaune et très-élastique, qui donne à ce vaisseau des propriétés toutes spéciales. Effectivement, à raison de l'élasticité de ce tissu, les artères ne reviennent jamais sur elles-mêmes. Si, par hasard, elles

viennent à être entamées, l'ouverture reste béante et ne se referme pas. Les veines qui, au contraire, manquent de la tunique élastique, ont des parois flasques qui reviennent facilement sur elles-mêmes; aussi, lorsqu'elles sont blessées, l'ouverture ne reste pas béante, et la cicatrisation s'effectue rapidement.

A mesure que les artères s'éloignent du cœur, elles se divisent en branches de plus en plus ténues. Les veines marchent en sens inverse et, par conséquent, se réunissent en branches de plus en plus grosses, pour se terminer au cœur par deux gros troncs. On a comparé ces deux systèmes de vaisseaux à un arbre dont le tronc serait courbé de façon que les dernières branches viendraient se confondre avec les dernières ramifications des racines.

On appelle ***vaisseaux capillaires*** l'assemblage de tubes déliés qui est interposé entre les dernières ramifications des artères et les premières des veines.

38. ***Distribution des artères.*** — Toutes les artères qui se distribuent au corps naissent par un seul tronc qui part du ventricule gauche et qui a reçu le nom d'artère ***aorte*** (*fig.* 11 et 12). Cette artère remonte vers la base du cou, puis se courbe en bas en formant la ***crosse de l'aorte***, enfin elle descend le long de la colonne vertébrale jusque dans l'extrémité de l'abdomen où elle se divise en deux branches. Dans ce trajet elle donne naissance à un grand nombre d'artères, dont les plus importantes sont :

1° Les ***artères carotides***, qui portent le sang à la tête;

2° Les artères qui se rendent aux membres antérieurs, et qui, à raison des régions qu'elles traversent, ont été désignées sous le nom de ***sous-clavières***, ***axillaires***, ***brachiales***, ***radiales*** et ***cubitales;***

3° Les ***artères intercostales***, qui partent de chaque côté de l'aorte et suivent le bord des côtes.

4° Le ***tronc cœliaque***, qui se divise en trois branches principales qui se rendent au foie, à l'estomac;

5° Les ***artères mésentériques***, supérieure et inférieure, qui se rendent aux intestins grêles et au gros intestin;

6° Les ***artères rénales***, qui se ramifient dans les reins.

7° Enfin les ***artères iliaques***, qui peuvent être considérées comme le résultat de la bifurcation de l'aorte; elles se rendent aux membres inférieurs. Dans la cuisse elles prennent le nom d'artères ***fémorales***, puis se divisent en plusieurs branches qui se ramifient dans la jambe et le pied.

39. *Distribution des veines.* — Les veines sont plus grosses et plus nombreuses que les artères; elles les accompagnent en général dans leur trajet. Le long d'une seule artère on voit souvent deux veines : il y en a aussi un grand nombre placées superficiellement. Cette disposition a sa raison d'être, car les artères dont les blessures ne peuvent pas se cicatriser doivent être mieux protégées et situées plus profondément. Les

veines se réunissent pour former deux gros troncs qui s'ouvrent dans l'oreillette droite du cœur et qui sont désignés sous le nom de ***veines caves inférieure*** (*fig.* 11) et ***supérieure***.

Il existe dans l'intérieur des veines, des replis membraneux, disposés en manière de soupapes ou ***valvules***, et destinés à empêcher le sang de revenir sur ses pas.

Si une pression accidentelle se fait sur une veine, la circulation, au lieu d'être ralentie, est alors activée; car le sang, ne pouvant revenir sur ses pas, est poussé vers le cœur.

Chez les mammifères et les oiseaux, ce système de valvules est très-développé; chez les poissons il manque.

Les veines de l'intestin présentent des particularités importantes à noter : après s'être réunies en tronc, elles pénètrent dans le foie, s'y ramifient de nouveau, à la manière des artères, pour se réunir ensuite et déboucher dans la veine cave inférieure. Ce système de canaux est appelé ***système de la veine porte***. Il est à remarquer qu'il est complétement dépourvu de valvules.

40. Circulation pulmonaire. — C'est à l'aide de tout cet ensemble de veines et d'artères que se fait la grande circulation. La petite, ou circulation pulmonaire, s'effectue à l'aide d'un vaisseau appelé ***artère pulmonaire*** (*fig.* 12), qui, partant du ventricule droit, se rend aux poumons; le sang revient ensuite dans l'oreillette gauche par la ***veine pulmonaire***, d'où il passe dans le ventricule gauche pour pénétrer ensuite dans l'aorte.

Par conséquent, si nous suivons rapidement la marche du fluide sanguin (*fig.* 13), nous verrons qu'après avoir servi à la nutrition des organes et s'être dépouillé de son oxygène, il revient dans l'oreillette droite par les

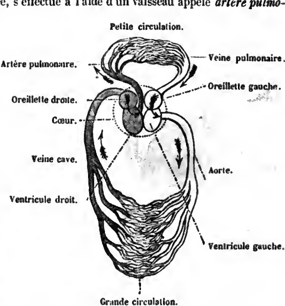


Fig. 13. — Figure théorique de la circulation dans les Mammifères.

veines caves supérieure et inférieure, passe dans le ventricule droit qui en se contractant le lance dans l'artère pulmonaire; après avoir subi l'influence vivifiante de l'air il revient dans l'oreillette gauche par les veines pulmonaires et passe dans le ventricule gauche, qui l'envoie dans l'aorte.

Le côté droit du cœur n'est donc traversé que par du sang veineux, le côté gauche que par du sang artériel.

41. **Mécanisme de la circulation.** — Si nous cherchons maintenant à nous rendre compte du mécanisme de la circulation, nous verrons que le sang est mis en mouvement par la contraction du cœur; que l'élasticité des artères transforme ce mouvement intermittent en un mouvement continu, et enfin que la direction du courant est réglée par le jeu des valvules.

La contraction des deux ventricules se fait en même temps, puis leurs parois se relâchent; c'est alors que les deux oreillettes se contractent. La contraction porte le nom de ***systole***, la dilatation celui de ***diastole***. Chez le cheval, le bœuf et les gros mammifères, les mouvements de systole et de diastole sont assez espacés; au contraire chez les petits animaux tels que la souris, le lapin, le chien, etc., ces mouvements sont très-rapprochés en un mot, le ***cœur bat vite***. Le ventricule gauche, en se contractant, tend à expulser le sang qui le remplit, or il communique: 1° avec l'oreillette gauche; 2° avec l'aorte. Ces deux orifices sont garnis de valvules; la ***valvule mitrale*** (*fig.* 14), qui bouche l'orifice auriculo-ventriculaire ne peut s'ouvrir que de haut en bas; les valvules ***sygmoïdes***, placées à l'entrée de l'aorte, s'ouvrent au contraire de bas en haut; le sang pressé par la contraction du ventricule s'échappera par conséquent par cet orifice, et lorsqu'il aura pénétré dans l'aorte, il ne pourra retourner en arrière, car les valvules sygmoïdes se seront refermées. Le sang qui aura distendu les parois de l'artère sera alors poussé en avant par l'élasticité propre à ce vaisseau et porté dans le réseau artériel.

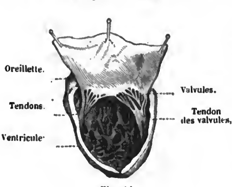


Fig. 14.

Dans les veines, le cours du sang est facilité par le jeu des valvules. Ce liquide ensuite arrive dans l'oreillette droite par les veines caves inférieure et supérieure; de là il passe dans le ventricule droit. Il existe entre ces deux cavités une soupape nommée ***valvule tricuspide***, qui em-

pêche le sang de refluer du ventricule dans l'oreillette et le dirige dans les artères pulmonaires.

42. **Phénomène du pouls.** — Le choc que l'on sent en posant le doigt sur certaines artères, et que l'on connaît sous le nom de *pouls*, est produit par l'ampliation du vaisseau sous l'influence de chaque ondée lancée par le cœur. Pour que ce phénomène puisse être perçu il faut que l'artère soit comprimée entre deux objets résistants, un os et le doigt de l'expérimentateur.

La découverte de la circulation du sang date de 1619 et est due à Harvey, médecin du roi d'Angleterre Charles Ier; il fit connaître d'une façon évidente le cours du sang dans les artères et dans les veines, mais il ne put découvrir quelle voie suivait ce liquide pour passer de l'un de ces systèmes de canaux dans l'autre.

Malpighi (1669), en examinant au microscope le poumon d'une grenouille vivante, y vit que les artères se divisaient à l'infini et que leurs dernières ramifications se continuaient avec les premières ramifications des veines; il vit les globules du sang circuler dans ce *réseau capillaire;* dès cet instant rien ne restait à expliquer dans le phénomène de la circulation.

Chez tous les animaux la circulation ne s'effectue pas d'une manière aussi parfaite que chez l'homme et les mammifères. Chez tous les vertébrés cependant le mécanisme général de la circulation paraît dériver du type général que nous venons d'étudier chez les mammifères et les oiseaux; mais chez les invertébrés il peut en être autrement, et le sang ou plutôt le liquide nourricier pourra, comme nous le verrons plus loin, être simplement répandu entre les organes. Quelquefois même l'organe d'impulsion, ou cœur, pourra manquer complétement.

43. **Circulation des reptiles.** — Chez les reptiles (*fig.* 15 et 16), le cœur se compose de trois cavités : un ventricule et deux oreillettes, et à cause de cette disposition le corps reçoit un mélange de sang veineux et de sang artériel; en effet, le sang veineux venant des diverses parties du corps se rend dans l'oreillette droite, et de là passe dans le ventricule unique. En même temps le sang artériel venant des poumons arrive dans l'oreillette gauche, puis dans le ventricule; là, les deux sangs se mêlent. Alors le ventricule, en se contractant, envoie à la fois le fluide nourricier en partie aux poumons et en partie au corps.

Chez les crocodiles (*fig.* 17), le cœur ressemble à celui des mammifères et des oiseaux, et présente quatre cavités : deux ventricules et deux oreillettes. Malgré cette particularité d'organisation, la partie antérieure du corps seule reçoit du sang artériel pur, la partie postérieure ne reçoit qu'un mélange de ce sang avec le sang veineux; ce résultat est dû à ce que de chaque ventricule part une artère aorte, et

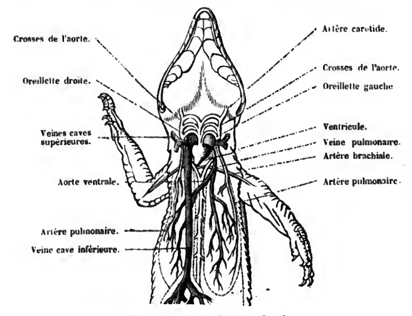


Fig. 15. — Circulation du Lézard.

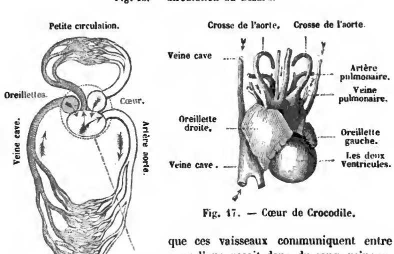


Fig. 16.
Circulation des Reptiles.

Fig. 17. — Cœur de Crocodile.

que ces vaisseaux communiquent entre eux ; l'une reçoit donc du sang veineux, l'autre du sang artériel ; mais à peu de distance du cœur, ces deux vaisseaux se réunissent et les deux sangs se mélangent. Quelques branches partent de l'aorte

artérielle avant son point de réunion avec sa congénère, et se rendent dans la tête, c'est ainsi que cette partie reçoit seule du sang artériel.

44. **Circulation des poissons.** — Chez les poissons (*fig.* 18, 19),

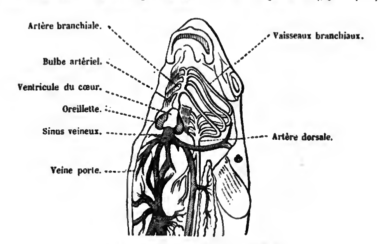


Fig. 18. — Circulation dans les Poissons.

le cœur se compose d'un seul ventricule et d'une seule oreillette et n'est jamais traversé que par du sang veineux ; en effet, le ventricule, par sa contraction, chasse le sang dans l'appareil branchial, où il subit l'influence vivifiante de l'air ; de là il se rend dans les différents vaisseaux de l'organisme, se réunit ensuite dans une espèce de sinus situé au-dessous de l'oreillette, passe dans celle-ci pour être de nouveau poussé dans le ventricule. Le cœur n'est traversé, chez ces animaux, que par du sang veineux.

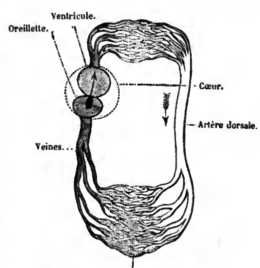


Fig. 19. — Circulation des Poissons.

45. — **Circulation des invertébrés.** — Chez les invertébrés

l'appareil circulatoire est loin de présenter les degrés de perfectionnement et de complication que nous venons de rencontrer chez les animaux vertébrés. Chez la plupart il n'existe de vaisseaux sanguins que sur une faible partie du parcours du sang, de façon que celui-ci tombe dans les lacunes qui existent entre les organes.

46. **Vers.** — Cependant chez les vers l'appareil vasculaire est clos et se compose de vaisseaux disposés longitudinalement le long du corps et reliés entre eux par quelques branches transversales. Il n'existe pas de cœur; mais les parois des vaisseaux sont contractiles, et mettent ainsi le sang en mouvement. Chez tous les autres articulés, le système circulatoire n'est pas complet, c'est-à-dire que les vaisseaux perdent leurs parois sur une partie de leurs parcours, et le sang tombe dans les interstices des organes.

47. **Insectes.** — Chez les insectes (*fig.* 20), il existe sur le dos un vaisseau contractile suspendu par des brides musculaires, et présentant de distance en distance des étranglements. Des ouvertures sont placées sur les côtés et garnies de valvules qui ne s'ouvrent que d'arrière en avant.

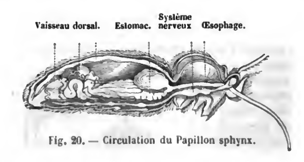


Fig. 20. — Circulation du Papillon sphynx.

Ce vaisseau porte le nom de ***vaisseau dorsal;*** le sang y entre aussi bien par son extrémité postérieure que par les ouvertures latérales, puis est chassé en avant par ses contractions jusque dans la région céphalique, où il tombe alors dans le système lacunaire. Chez ces animaux il n'y a ni artères ni veines.

48. **Arachnides.** — Chez les arachnides on voit quelques canaux s'ajouter au vaisseau dorsal et le système vasculaire se compliquer de plus en plus.

49. **Crustacés.** — Chez les crustacés les plus inférieurs on trouve encore un vaisseau dorsal; mais chez les écrevisses et les crabes il existe un cœur situé dans la région thoracique et donnant naissance à un grand nombre d'artères, dont les branches terminales perdent leurs parois et se confondent avec les lacunes. Le sang se rend ensuite dans les branchies, puis, par un système particulier de tubes, revient au cœur, qui ne se

compose que d'un ventricule (*fig.* 21). Cet organe est donc encore aortique, c'est-à-dire artériel, et le cercle vasculaire est incomplet.

50. **Mollusques.** — Chez tous les mollusques (*fig.* 22) la circulation est également en partie lacunaire, et le système vasculaire manque de parois sur une partie plus ou moins longue de son trajet. Le cœur se compose d'un ventricule et d'une ou de deux oreillettes, il est situé sur le trajet du sang artériel et donne naissance à des artères qui portent le fluide nourricier dans l'épaisseur des organes. De là le sang tombe dans les lacunes, puis arrive dans les

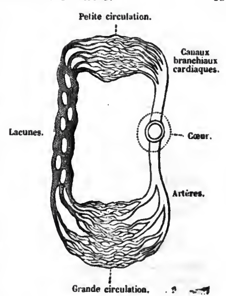


Fig. 21. — Circulation des Crustacés.



Fig. 22. — Circulation du Colimaçon [1].

[1] *a* bouche. — *bb* pied. — *c* l'anus. — *dd* poumon. — *e* estomac. — *ff* intestin. — *g* foie. — *h* cœur. — *i* artère aorte. — *j* artère gastrique. — *l* artère hépatique. — *k* artère du pied. — *mm* cavité abdominale jouant le rôle de sinus veineux. — *nn* canal irrégulier portant le sang de la cavité abdominale au poumon. — *oo* vaisseau qui porte le sang artériel du poumon au cœur.

organes respiratoires où il se canalise de nouveau pour retourner à l'oreillette.

51. **Molluscoïdes.** — Chez les molluscoïdes le tube intestinal est suspendu dans la cavité générale du corps, et c'est dans cette dernière que se trouve renfermé le liquide nourricier, qui chez quelques-uns des animaux de ce groupe est mis en mouvement par une sorte de cœur en forme de tube, qui se contracte indifféremment dans un sens ou dans l'autre, et pousse le sang tantôt de droite à gauche, tantôt de gauche à droite.

52. **Zoophytes.** — Enfin nous avons déjà vu (parag. 23) que chez beaucoup de zoophytes il n'existait aucune différence entre l'appareil digestif et l'appareil circulatoire, et que les matières élaborées pendant la digestion étaient ballottées pendant un certain temps dans la cavité intestinale.

RESPIRATION

Phénomènes chimiques de la respiration. — Asphyxie. — Appareil de respiration aérienne des mammifères, des oiseaux des batraciens, des Reptiles. — Respiration branchiale, trachéenne et cutanée.

53. — *La* RESPIRATION *est une fonction par laquelle le sang veineux chargé d'acide carbonique et impropre à la nutrition des organes perd, dans des organes spéciaux, cet acide carbonique, et se charge d'oxygène qu'il utilise ensuite pour la combustion vitale.*

54. **Phénomènes chimiques de la respiration.** — Nous avons dit que le sang noir, en passant dans l'appareil respiratoire où il se trouve en contact avec l'air, se change en sang rouge, c'est-à-dire en sang artériel. Le sang artériel contient beaucoup plus d'oxygène que le sang veineux, qui est riche en acide carbonique. L'air est donc nécessaire à l'entretien de la vie de tous les êtres organisés, animaux ou végétaux. Quand ce fluide vient à manquer, les êtres vivants ne tardent pas à mourir d'asphyxie. Les animaux qui habitent le fond des eaux respirent au moyen de l'air qui est en dissolution dans ce liquide; et si l'on fait bouillir l'eau de façon à en chasser les gaz qu'elle tenait en dissolution, elle devient impropre à entretenir la vie des poissons et des autres animaux aquatiques qui, au bout d'un court espace de temps, meurent asphyxiés.

L'air qui nous entoure est composé de 21 parties d'oxygène et de 79 d'azote; l'oxygène seul est utilisé dans la respiration, l'azote ne sert qu'à affaiblir son action trop puissante; car à l'état de pureté il serait impropre à l'entretien de la vie.

Si l'on examine les changements que l'air a subis pendant son passage à travers les poumons, on voit qu'il a perdu de l'oxygène et qu'il s'est

chargé d'acide carbonique; ce dernier gaz ne peut servir à la respiration: un animal que l'on y plonge ne tarde pas à mourir. Aussi, lorsque dans un espace clos on enferme des êtres vivants, l'air change bientôt de nature, il se charge d'acide carbonique et devient irrespirable. L'air qui a traversé les poumons contient en outre une certaine quantité de vapeur d'eau dont il est facile de constater la présence en expirant sur un corps froid qui en détermine la condensation.

55. — Lavoisier démontra, le premier, les analogies qui existent entre la combustion du charbon et les phénomènes de respiration. Quand le charbon brûle dans l'air, il absorbe l'oxygène et il se produit de l'acide carbonique Dans la respiration le même gaz prend naissance, donc les phénomènes respiratoires sont des phénomènes de combustion. Lavoisier constata que la quantité d'oxygène absorbée n'était pas remplacée par une quantité équivalente d'acide carbonique; il en conclut que l'excès d'oxygène s'était combiné à de l'hydrogène pour former de l'eau.

Ce célèbre chimiste pensait que la combustion respiratoire avait lieu dans les poumons. William Edwards démontra que cette manière de voir était inadmissible, puisque si l'on plonge, pendant quelque temps, un animal dans de l'azote, le dégagement d'acide carbonique continue toujours à se produire. On reconnut alors que cette combustion respiratoire avait lieu dans l'intérieur de tous les organes, et, que dans les poumons, il ne se faisait qu'un échange entre les gaz du sang et ceux de l'air. En effet, le liquide nourricier qui a servi à l'entretien des tissus s'y charge d'acide carbonique, il revient aux poumons; là, à travers les membranes minces des vésicules pulmonaires, il se produit de véritables phénomènes d'osmose à travers les parois minces et perméables des vésicules entre les gaz de l'atmosphère et ceux que le sang retient, soit à l'état de dissolution, soit à l'état de combinaison lâche. L'acide carbonique est exhalé tandis que l'oxygène est absorbé, puis transporté dans l'intérieur du corps, où il sert à la combustion, et, là, se change en acide carbonique.

56. **Asphyxie.** — Nous avons déjà eu l'occasion de dire que lorsqu'un animal était soustrait à l'influence vivifiante de l'air, il ne tardait pas à mourir asphyxié.

Tantôt l'asphyxie arrive par le fait seul de la privation d'oxygène et par l'impossibilité où est le sang, resté noir, de servir à la nutrition des tissus; l'asphyxie est dite *négative*, elle se produit quand un animal est plongé dans de l'hydrogène, dans de l'azote ou dans un autre gaz qui n'agit pas comme poison.

Tantôt l'asphyxie est *positive*, c'est-à-dire qu'elle résulte de l'action directe d'un gaz délétère et impropre à la respiration, tel que l'oxyde de carbone, l'acide sulfhydrique, le chlore, etc. Le protoxyde d'azote, de même que l'oxygène, transforme le sang veineux en sang artériel; mais

il produit, quand on le respire, des désordres nerveux, analogues à ceux de l'ivresse, et qui lui ont fait donner le nom de *gaz hilariant*.

57. **Appareil respiratoire des mammifères.** — D'après l'examen des faits qui précèdent on comprend donc qu'il est nécessaire que l'air se renouvelle facilement et continuellement dans l'appareil respiratoire. Cet appareil varie beaucoup suivant les animaux chez lesquels on l'étudie. Nous allons d'abord l'examiner dans sa plus grande complication, c'est-à-dire chez l'homme et chez les mammifères.

Chez ces animaux l'appareil respiratoire se compose :

1° De parties essentielles :

Les poumons et leurs conduits ;

2° De parties accessoires :

Les muscles qui déterminent l'entrée et la sortie de l'air dans les poumons.

58. **Poumons.** — Les Poumons (*fig.* 23), au nombre de deux, sont logés dans le thorax de chaque côté du cœur. Ils sont enveloppés dans une membrane séreuse, appelée *plèvre*, qui tapisse également les parois thoraciques; ils se composent d'une multitude de petites cellules ou vésicules dans les parois desquelles existe un riche réseau capillaire; chacune de ces petites vésicules reçoit un petit conduit aérien, ces conduits se réunissent en branches de plus en plus grosses nommées *bronches*, qui débouchent elles-mêmes dans un tronc nommé *trachée-artère*.

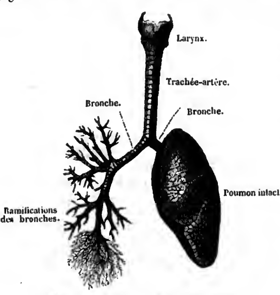


Fig. 23. — Appareil respiratoire de l'Homme.

59. **Trachée-artère.** — La trachée-artère (*fig.* 23), est un tube qui part de l'arrière-bouche, descend le long du cou en avant de l'œsophage; il est formé d'une suite d'anneaux cartilagineux, interrompus en arrière, de façon à ce que la trachée ne puisse comprimer le tube alimentaire, et

qu'elle ne puisse s'affaisser et rendre ainsi le passage de l'air difficile. Intérieurement elle est tapissée par une membrane muqueuse qui se continue avec celle de la bouche, mais dont la structure est différente. En effet, les cellules dont elle est couverte sont hérissées de cils vibratiles continuellement en mouvement. Ce tube se termine supérieurement par le larynx, organe producteur de la voix.

La longueur de la trachée varie beaucoup suivant les espèces; chez la girafe, par exemple, son développement est considérable, tandis que chez l'ours et beaucoup d'autres animaux dont le cou est court le larynx se termine presque aux poumons.

60. **Mécanisme de l'inspiration et de l'expiration.** — L'entrée de l'air dans les voies respiratoires est déterminée par le jeu des parois de la chambre thoracique qui fonctionnent comme une pompe, tantôt aspirante, tantôt foulante. Ces parois sont formées sur les côtés, par les *côtes* et les *muscles intercostaux*, en bas par le muscle *diaphragme*.

61. **Diaphragme.** — Chez les mammifères, c'est le diaphragme (*fig.* 24) qui concourt avec le plus de puissance aux mouvements respiratoires. Ce muscle présente la forme d'une voûte séparant le thorax de l'abdomen; il prend ses points d'attache sur les côtes et sur la partie lombaire de la colonne vertébrale. En se contractant il se tend, et par conséquent s'applatit; le volume de la cavité thoracique est alors augmenté.

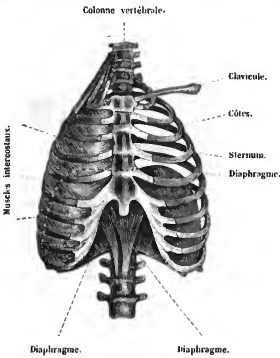


Fig. 24. — Cage thoracique de l'Homme.

62. **Côtes.** — Les côtes (*fig.* 24) qui, réunies au sternum, constituent la charpente solide du thorax ne sont pas immobiles; dans l'état de

repos elles sont obliques et leur partie médiane est plus basse que leurs points d'insertion; par l'action de certains muscles et principalement des intercostaux, elles peuvent s'élever; le diamètre transversal de la poitrine est alors augmenté, et le sternum est poussé en avant. Or, comme les poumons se trouvent placés dans une cavité complétement close, et que la seule communication avec l'extérieur se fait par la trachée-artère, l'air se précipite dans les poumons pour remplir le vide qui se forme dans la cage thoracique.

La manière dont l'air est expiré est beaucoup plus simple; lorsque la contraction des muscles inspirateurs cesse, le tissu du poumon étant élastique, tend à revenir sur lui-même et expulse les gaz contenus dans les vésicules. Le nombre des mouvements d'inspiration varie beaucoup suivant les animaux :

Chez la baleine il est de 4 ou 5 par minute. Chez le cheval et le bœuf, de 10 ou 12. Chez l'homme, de 16 à 20. Chez le chien, de 20 à 25.

63. **Appareil respiratoire des oiseaux.** — L'appareil respiratoire des oiseaux (*fig.* 25), présente des dispositions importantes à

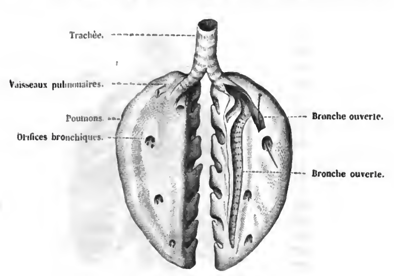


Fig. 25. — Poumons d'Oiseau.

noter. Quelques-uns des gros troncs bronchiques traversent le poumon sans s'y terminer et débouchent dans de grandes poches aériennes placées au-devant du cou, ainsi que dans l'abdomen. L'air peut ainsi arriver jusque dans l'intérieur des os. Le renouvellement de l'air dans ces cavités se fait très-facilement, de sorte qu'un oiseau peut respirer par un orifice accidentel pratiqué dans une des poches abdominales.

Le muscle diaphragme n'est représenté chez les oiseaux que d'une manière très-imparfaite, et les mouvements d'inspiration s'effectuent principalement au moyen des côtes. De plus, les poumons, au lieu d'être libres dans la cavité thoracique, sont adhérents aux côtes.

64. **Appareil respiratoire des reptiles et des batraciens**. — Chez la plupart des reptiles et des batraciens les poumons se présentent sous la forme d'un sac; on y remarque quelques aréoles, mais la division en cellules s'y observe rarement. Chez quelques-uns d'entre eux, les grenouilles par exemple, où il n'y a pas de côtes, l'animal avale l'air et l'introduit dans ses voies aériennes par des mouvements de déglutition.

65. **Respiration branchiale**. — *Poissons*. — Chez les poissons, qui sont destinés à vivre dans l'eau, la respiration ne se fait plus à l'aide des poumons, mais au moyen d'organes appelée *branchies*, consistant en prolongements frangés et membraneux d'une structure extrêmement délicate, très-riches en vaisseaux sanguins et logés dans une cavité située de chaque côté du corps en arrière de la tête, et où l'eau peut facilement circuler, puis s'échapper au dehors par des ouvertures appelées *ouïes*.

66. *Crustacés*. — Chez les crustacés la respiration s'effectue de la même manière, et les branchies sont en général placées sous la carapace de chaque côté du corps.

67. *Vers*. — Chez beaucoup de vers on remarque à la surface du corps des prolongements en forme de panaches ou de franges, où le sang se rend en abondance et subit l'influence de l'air dissous dans l'eau.

68. *Mollusques*. — Chez la plupart des mollusques la respiration se fait également à l'aide de branchies, tantôt logées dans une cavité spéciale, tantôt flottant librement à l'extérieur.

Quelques mollusques, tels que le limaçon respirent à l'aide de poumons.

69. **Respiration trachéenne**. — *Insectes*. — Chez les *insectes* (*fig.* 26), chez les *myriapodes* et chez un grand nombre d'*arachnides* ce n'est plus le sang qui va chercher l'air, c'est au contraire l'air qui circule dans des canaux pour se mettre en contact avec le sang. On voit le long des flancs de l'animal de petites boutonnières, appelées *stigmates*, servant d'orifices à des tubes qui se ramifient de plus en plus et se rendent dans toutes les parties de l'économie. Ces tubes ou *trachées* se composent d'une tunique interne, d'une tunique externe de nature cellulaire et d'une tunique moyenne élastique constituée par un fil roulé en spirale entre la membrane externe et l'interne; ce fil sert à maintenir les trachées toujours béantes.

Les tuniques des trachées ne paraissent pas soudées les unes aux autres, il existe souvent entre elles des espaces vides. Quelques auteurs ont pensé que le sang, en circulant entre ces membranes, subissait l'influence de l'air et que c'était ainsi que s'effectuait la respiration. Mais

ce fait n'est pas encore suffisamment prouvé, car la lame de sang, qui peut s'introduire dans l'intervalle laissé entre les tuniques des trachées est tellement faible, que l'effet que pourrait produire son oxygénation sur la masse du sang serait presque nulle.

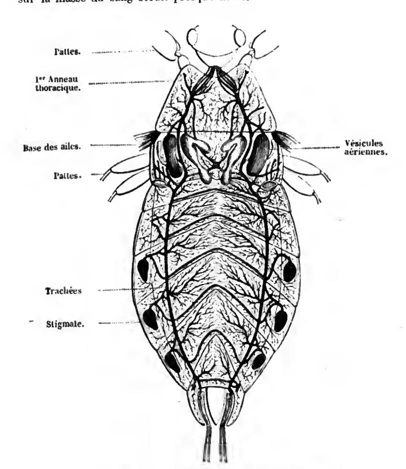


Fig. 26. — Appareil trachéen d'insecte (la Nèpe).

70. *Arachnides.* — Quelques arachnides respirent à la fois par des trachées et par de petits sacs appelés ***poches pulmonaires***. Quelques-uns, les araignées ordinaires et les scorpions, par exemple, respirent uniquement à l'aide de ces poches pulmonaires, qui sont logées dans l'abdomen. A raison de cette particularité on les désigne sous le nom d'arachnides pulmonaires.

71. **Respiration cutanée.** — Enfin quelques êtres, d'une organisation dégradée, ne présentent ni poumons, ni branchies, ni trachées. L'échange entre les gaz du liquide nourricier et ceux de l'air se fait à travers la peau. — La peau peut, chez beaucoup d'animaux pourvus de poumons, venir en aide à ces organes et servir jusqu'à un certain point à la respiration. Les grenouilles, par exemple, peuvent vivre longtemps après l'ablation de leurs poumons; mais chez beaucoup d'animaux la peau seule sert à la respiration. Parmi ces derniers on peut citer les zoophytes, et même parmi les annelés, quelques vers sont dans le même cas, les sangsues, par exemple. On a cru pendant quelque temps que de petites poches situées sur les côtés du corps de ces dernières représentaient l'appareil respiratoire; il est connu aujourd'hui que ces petits organes sont des dépendances de l'appareil génital.

CHALEUR ANIMALE

72. — Comme nous l'avons vu, Lavoisier avait reconnu que la respiration n'est qu'un phénomène de combustion dans lequel l'oxygène de l'air brûle le carbone et l'hydrogène de l'organisme pour donner naissance à de l'acide carbonique et à de l'eau. Or, toute combustion entraîne nécessairement une production de chaleur; les animaux sont donc de véritables foyers permanents. Mais tous ne le sont pas au même degré: les uns, tels que l'homme, les oiseaux et les mammifères, produisent beaucoup de chaleur; les autres, tels que les poissons, les reptiles n'en produisent que peu. Cette différence est facilement appréciable, aussi avait-on désigné les premiers sous le nom d'*animaux à sang chaud*, tandis que l'on appelait les autres *animaux à sang froid*. Cette dénomination n'est pas l'expression exacte de la vérité, en ce que les animaux à sang froid produisent une quantité de chaleur faible, il est vrai, mais que l'on peut cependant facilement constater.

73. **Animaux à température constante.** — Les mammifères et les oiseaux, que l'on appelait animaux à sang chaud, ont cela de spécial que leur température est à peu près indépendante des variations de température du milieu ambiant. Aussi doit-on les désigner plutôt sous le nom d'*animaux à température constante.*

74. *Animaux hybernants.* — Certains mammifères ne peuvent produire que peu de chaleur; aussi, en été, leur température s'élève autant que celle des autres animaux de la même classe; mais en hiver elle s'abaisse beaucoup, et ils se refroidissent jusqu'à ce qu'ils tombent dans un état de torpeur et d'engourdissement qui dure autant que le froid. Ces animaux, appelés *hybernants* sont assez nombreux; ce sont : les marmottes, les ours, les blaireaux, les loirs, les chauve-souris, les hérissons, etc.

La température propre de l'homme est d'environ 37° centig. Celle des mammifères varie entre 36° et 39°. Les oiseaux produisent plus de chaleur, leur température est d'environ 40° à 42°.

75. **Animaux à température variable.** — Les reptiles et les poissons produisent une quantité de chaleur très-faible; elle varie, suivant les espèces, mais elle dépasse rarement 1 à 2 degrés. Aussi ne doit-on pas les appeler animaux à sang froid, mais *bien à température variable.*

Les animaux invertébrés jouissent aussi de la faculté de produire de la chaleur; chez les abeilles cela est facile à constater, et la température des ruches est toujours plus élevée que celle de l'air.

La température propre des insectes ailés est plus élevée que celle des autres articulés. — Les mollusques et les zoophytes produisent aussi une certaine quantité de chaleur, mais beaucoup moindre que les insectes.

76. La température de tous les organes d'un même individu n'est pas identique; elle est plus élevée là où le sang circule avec plus d'activité, par conséquent où la combustion vitale est la plus active. La température d'un muscle qui se contracte est plus élevée que celle du même muscle au repos. — Les organes intérieurs sont plus chauds que les organes placés à la périphérie, ce qui s'explique facilement parce que les causes de refroidissement y sont moins intenses.

77. L'évaporation qui se fait à la surface du corps sert à contre-balancer les effets de la chaleur extérieure et à empêcher la température du corps de s'élever au-dessus de son terme fixe. L'air ambiant peut être extrêmement chaud sans que la température intérieure varie, et cela parce que l'évaporation, étant très-active, enlève une grande quantité de calorique. Lorsque l'air est sec, les animaux peuvent supporter des températures très-élevées. Ainsi on a vu des hommes entrer dans des fours chauffés à 120°, et y rester quelques instants; mais si l'air est humide, l'évaporation cutanée se fait difficilement, et les animaux résistent mal à l'action d'une haute température.

FONCTIONS DE RELATION

78. — Les fonctions de nutrition ne servent qu'à l'accroissement des organes, et à la réparation journalière des tissus; indépendamment de ces fonctions, il en existe d'autres destinées à mettre l'animal en rapport avec le monde extérieur; on les appelle *fonctions de relation.*

Les animaux sont tous doués d'une *volonté* parfaitement indiquée; sous son influence, ils dirigent leurs mouvements vers tel ou tel but. Ces mouvements s'exécutent à l'aide de muscles qui sont doués de la propriété de se contracter, c'est-à-dire de se raccourcir et d'agir sur les pièces solides, sur les leviers qui constituent la charpente de l'animal.

De plus, les animaux, comme nous l'avons déjà dit, ont conscience des impressions extérieures, en un mot, *ils sentent.*

La volonté et la sensibilité sont sous la dépendance du *système nerveux.* Aussi allons-nous commencer l'étude des fonctions de relation par celle de ce système.

SYSTÈME NERVEUX

79. — Le système nerveux est chargé de présider aux phénomènes du mouvement et de la sensibilité.

Ce système se compose de deux parties, l'une appelée système nerveux de la *vie animale* ou *cérébro-spinal*, l'autre, système nerveux de la *vie organique*, ou *grand sympathique*, ou *système ganglionnaire.* Ce dernier se rend aux organes de nutrition et est chargé de veiller à l'exécution des mouvements dont nous n'avons pas conscience et sur lesquels notre volonté n'agit pas, comme ceux du cœur, des intestins, de l'estomac, etc.

Chez les animaux vertébrés de même que chez les invertébrés, il existe un système nerveux; mais le plan fondamental de son organisation diffère complétement.

Chez les vertébrés, les deux systèmes, celui qui préside à la vie de relation, aussi bien que celui de la vie de nutrition, sont au-dessus du tube digestif.

Chez les invertébrés, le cerveau et le système de la vie de nutrition sont au-dessus du tube intestinal, tandis que les autres parties du système de la vie de relation sont au-dessous.

80. **Système nerveux des vertébrés.** — Le système de la vie de relation se compose de deux parties bien distinctes : les masses centrales ou *axe cérébro-spinal* et les filets périphériques ou *nerfs.*

AXE CÉRÉBRO-SPINAL.

L'axe cérébro-spinal, placé sur la ligne médiane du corps, occupe l'intérieur de la tête et de la colonne vertébrale; il comprend le cerveau, les lobes optiques, le cervelet, la moelle allongée et la moelle épinière.

81. **Cerveau.** — Le *cerveau* (*fig.* 27) occupe toute la partie antérieure et supérieure du crâne.

82. *Membranes du cerveau.* — Le cerveau s'appuie en avant sur les voûtes orbitaires et en arrière sur un repli de la *dure-mère*, membrane fibreuse très-résistante qui tapisse l'intérieur du crâne et du canal formé par les vertèbres, et qui sert à protéger l'axe cérébro-spinal et à le maintenir en place; aussi forme-t-elle, dans ce but, différents replis, dont deux principaux : *la tante et la faux du cerveau;* le premier est transversal, et sépare le cervelet du cerveau et soutient ce dernier or-

gane ; le second, situé sur la ligne médiane, est vertical, et sépare le cerveau en deux hémisphères.

La dure-mère ne protégerait pas suffisamment la substance cérébrale, aussi celle-ci est-elle entourée d'une membrane séreuse, l'*arachnoïde*, qui sécrète un liquide appelé céphalo-rachidien, dans lequel est suspendu l'axe cérébro-spinal, qui se trouve ainsi parfaitement à l'abri.

Indépendamment de ces deux membranes, le cerveau et le cervelet sont immédiatement enveloppés par la *pie-mère*, que l'on peut considérer plutôt comme un lacis de vaisseaux sanguins que comme une membrane. Elle pénètre dans tous les replis du cerveau.

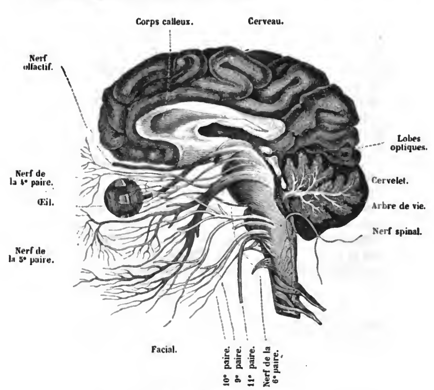


Fig. 27. — Coupe du Cerveau.

85. *Hémisphères cérébraux.* — Comme nous venons de le dire, le cerveau est divisé, par la faux cérébrale, en deux moitiés latérales nommées hémisphères du cerveau. Ces deux masses sont coupées en dessous par deux scissures qui les divisent chacune en trois lobes désignés sous les noms d'antérieur moyen et postérieur.

La surface du cerveau est remarquable par la présence d'un nombre considérable de replis, arrondis, flexueux, ondulés, nommés *circonvolutions du cerveau* (*fig.* 27). La couche extérieure est formée de substance grise, tandis qu'au contraire toute la partie centrale est constituée par de la substance blanche.

Si l'on écarte un peu les hémisphères cérébraux on verra sur la ligne médiane une large bande de substance blanche réunissant ces deux moitiés, et désignée sous le nom de *mésolobe* ou *corps calleux* (*fig.* 27). Si on coupe cette commissure, on verra que le cerveau n'est pas constitué par une masse pleine, mais qu'il est creusé à l'intérieur de cavités appelées *ventricules*. Ces ventricules sont au nombre de quatre; l'un, situé sur la ligne médiane en avant et au-dessous du corps calleux, porte le nom de cinquième ventricule ou *sceptum lucidum*, à cause de la transparence de ses parois; deux autres, placés au-dessous et des deux côtés du corps calleux, sont beaucoup plus grands et portent le nom de ventricules latéraux; enfin, sur la ligne médiane, au-dessous du corps calleux, se trouve une autre cavité connue sous le nom de ventricule moyen ou troisième ventricule.

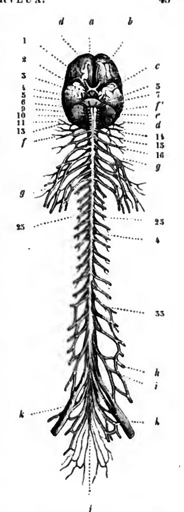


Fig. 28. — Axe cérébro-spinal de l'Homme[1].

84. Cervelet. — Le cervelet (*fig.* 27 et 28) est logé dans les fosses occipitales, dont il reproduit la forme. Aussi est-il plus large que haut; il est divisé en deux moitiés ou hémisphères cérébelleux par une rainure, et, sur la ligne médiane, il présente un enfoncement profond qui loge l'origine de la moelle épinière, ainsi qu'un

[1] Système cérébro-spinal vu par sa face antérieure, les nerfs étant coupés à peu de distance de leur origine. — *a* cerveau. — *b* lobe antérieur de l'hémisphère gauche du cerveau. — *c* lobe moyen. — *d* lobe postérieur. — *e* cervelet. — *f'* moelle allongée. — *f* moelle épinière. — 1 nerfs de la 1re paire ou olfactifs. — 2 nerfs de la 2e paire ou optiques. — 3 nerfs de la 3e paire. — 4 nerfs de la

lobe moyen. — Si l'on fait une coupe du cervelet on trouvera de même que dans le cerveau la matière grise entourant la matière blanche; cette dernière, en se ramifiant, forme ce que l'on appelle *l'arbre de vie*, auquel on donnait autrefois une importance qu'il n'a réellement pas. Le cervelet recouvre une cavité appelée quatrième ventricule; les pédoncules cérébelleux se continuent avec la moelle allongée; ils semblent passer sous une espèce de pont formé par une large bande de substance blanche qui s'étend d'un hémisphère à l'autre et est connue sous le nom de *pont de Varole* ou *protubérance annulaire*.

Entre le cervelet et le cerveau, se trouvent quatre éminences arrondies, disposées par paires et nommées *tubercules quadrijumeaux* ou *lobes optiques* (*fig*. 27).

85. **Moelle épinière**. — La moelle épinière (*fig*. 28) est la partie de l'axe cérébro-spinal logée dans le tube vertébral; elle s'étend jusqu'à la première ou deuxième vertèbre lombaire, à la partie supérieure elle se renfle et porte le nom de *moelle allongée*. On y remarque dans cette partie six éminences: deux *pyramides antérieures* et deux *postérieures*, séparées par les *corps olivaires*.

La moelle épinière se présente sous la forme d'un long cordon irrégulièrement cylindrique muni de deux renflements, l'un supérieur ou brachial, répondant à la naissance des nerfs des membres antérieurs, l'autre inférieur ou lombaire correspondant à la naissance des nerfs des membres postérieurs. La moelle épinière se termine inférieurement par un faisceau nerveux qui a reçu le nom de *queue de cheval*. Dans toute son étendue la moelle donne naissance à des nerfs qui sortent du canal vertébral par les trous de conjugaison et se distribuent dans les différentes parties du corps.

De même que le cerveau et le cervelle, la moelle se compose de substance grise et de substance blanche; mais, contrairement à ce que l'on observe pour l'encéphale, c'est cette dernière qui entoure l'autre.

ORGANES PÉRIPHÉRIQUES OU NERFS.

Les nerfs partent tous de la moelle épinière ou de la base du cerveau, et sortent soit de la base du crâne, soit des trous de conjugaison des vertèbres; par ce fait seul, on les a divisés en *nerfs rachidiens* et *nerfs crâniens*.

4° paire. — 5 nerfs trifaciaux ou de la 5° paire. — 6 nerfs de la 6° paire. — 7 nerfs faciaux. — 8 nerfs acoustiques. — 9 nerfs glosso-pharyngiens. — 10 nerfs pneumo-gastriques. — 11 et 12 nerfs des 11° et 12° paires. — 13, 14, 15, 16 nerfs cervicaux. — *g* nerfs cervicaux formant le plexus brachial. — 25 nerfs de la partie dorsale de la moelle épinière. — 33 l'une des paires de nerfs lombaires. — *h* nerfs lombaires et sacrées formant des plexus. — *i* et *j* queue de cheval. — *k* nerf sciatique se rendant aux membres inférieurs.

86. **Nerfs crâniens.** — On compte 12 paires de nerfs crâniens (*fig.* 27).

La 1re paire ou *nerfs olfactifs* se rend dans les fosses nasales.

La 2e paire forme les *nerfs optiques*, qui naissent sous le lobe moyen et entre-croisent leurs fibres avant de sortir du crâne, de sorte que le nerf gauche passe à droite, et réciproquement. L'épanouissement de ces nerfs dans l'œil forme la *rétine*.

Les nerfs de la 3e paire servent aux mouvements de l'œil, et portent le nom de *nerfs oculo-moteurs communs*.

Les *nerfs pathétiques* ou de la 4e paire servent aussi aux mouvements de l'œil.

Les nerfs de la 5e paire ou *trijumeaux* naissent de la moelle allongée, et se ramifient dans toute la face.

La 6e paire est celle des *nerfs oculo-moteurs externes*, qui se distribuent aux muscles de l'œil.

La 7e paire constitue les *nerfs faciaux*.

La 8e paire ou *nerfs acoustiques* sert à l'audition.

La 9e paire forme les nerfs *glosso-pharyngiens*, qui se distribuent dans les muscles de la langue et dans les parties voisines.

La 10e paire, nommée *nerf vague* ou *pneumo-gastrique*, naît de la moelle allongée, descend le long du cou jusque dans la poitrine et l'abdomen, en envoyant des branches aux organes de la respiration et de la digestion.

La 11e paire forme le *nerf spinal*, et se distribue au muscle trapèze.

La 12e paire ou *nerf hypoglosse* sert aux mouvements de la langue.

87. **Nerfs rachidiens.** — Les nerfs rachidiens (*fig.* 28) sont au nombre de 31 paires : 8 paires cervicales, 12 dorsales, 5 lombaires, 6 sacrées.

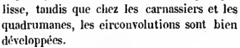
Ces nerfs naissent de la moelle épinière par deux racines, composées chacune de plusieurs faisceaux. L'une de ces racines, l'antérieure, est plus petite que la postérieure ; elles convergent l'une vers l'autre. La postérieure présente avant son point de réunion un petit renflement ou ganglion composé en majeure partie de substance médullaire grise.

Les nerfs sont formés d'un nombre immense de fibres cylindriques, constituées par une sorte de gaîne transparente, la névrilème, dans laquelle se trouve la substance cérébrale ou pulpe nerveuse. Les nerfs, de même que les vaisseaux sanguins, s'anastomosent, mais sans se mêler ; les fibres d'un faisceau vont simplement s'accoler à celles d'un autre sans perdre leur enveloppe ou névrilème. Ils vont ainsi en se ramifiant de plus en plus ; la plupart se terminent en anse, c'est-à-dire qu'ils reviennent sur leurs pas.

88. **Système grand sympathique.** — Chez l'homme et chez les mammifères, le système nerveux de la vie organique ou de nutrition porte le nom de système *grand sympathique* ou *ganglionnaire :* il est formé d'une série de petites masses de tissus nerveux ou ganglions qui commencent dans l'intérieur du crâne, puis envoient des filets qui vont

les relier à d'autres ganglions, dans le cou et le long de la colonne vertébrale, de façon à former une double chaîne depuis la tête jusqu'au bassin. De ces ganglions émanent des filets qui constituent des plexus dont le principal est le *plexus solaire*, qui envoie lui-même des branches aux différents organes de l'appareil digestif.

89. **Système nerveux des mammifères.** — Chez tous les mammifères, le système nerveux ne présente pas ce degré de perfectionnement; le rapport des parties et leur disposition essentielle ne sont pas constantes, mais le volume de la masse cérébrale, et surtout le développement des circonvolutions paraît être en raison directe de l'intelligence. Chez les insectivores et les rongeurs, la surface du cerveau est presque lisse, tandis que chez les carnassiers et les quadrumanes, les circonvolutions sont bien développées.



Cerveau. Lobes optiques. Cervelet. Moelle épinière.

Fig. 29. Cerveau d'Autruche.

Chez les mammifères didelphiens, le corps calleux manque complétement.

90. **Oiseaux.** — Dans la classe des oiseaux (*fig.* 29), l'encéphale est peu développé, les hémisphères n'offrent pas de circonvolutions, et, de même que chez les mammifères didelphiens, le corps calleux manque. Les lobes optiques prennent un grand accroissement; ils débordent les lobes cérébraux. La protubérance annulaire ou pont de varole ne se trouve plus.

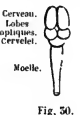


Fig. 30. Cerveau de Reptile.

91. **Reptiles et batraciens.** — Chez les reptiles et les batraciens (*fig.* 30), l'encéphale est encore moins développé, les hémisphères cérébraux sont lisses, les lobes olfactifs se développent beaucoup, et les lobes optiques sont en général très-grands, et placés en arrière des hémisphères; le cervelet est très-réduit.

92. **Poissons.** — Chez les poissons, la masse cérébrale est encore moins développée, les lobes olfactifs et les lobes optiques égalent en volume les hémisphères cérébraux; ces diverses parties sont placées par paires les unes à la suite des autres.

93. **Système nerveux des invertébrés.** — Nous avons déjà dit que le système nerveux des invertébrés différait complétement de celui des vertébrés, en ce que chez eux le cerveau et le système viscéral étaient supérieurs au tube digestif, tandis que le reste du système de la vie de relation lui était inférieur, de façon que, par leur réunion, ces parties constituent autour de ce tube une sorte d'anneau appelé *collier œsophagien.*

Le système nerveux des animaux articulés offre ce caractère fondamental, que les parties similaires se répètent dans le sens de la longueur. L'animal se compose d'une série d'anneaux semblables, qui renferment chacun les mêmes éléments, c'est-à-dire deux ganglions nerveux réunis entre eux par des commissures, et réunis aux précédents, ainsi qu'aux suivants par des connectifs.

94. *Insectes.* — Chez les insectes les plus simples (*fig.* 31, A), on trouve dans la tête deux ganglions soudés entre eux et placés au-dessus du tube digestif ; ils envoient des filets qui les réunissent à la paire de ganglions de l'anneau suivant, située au-dessous du tube intestinal. L'œsophage se

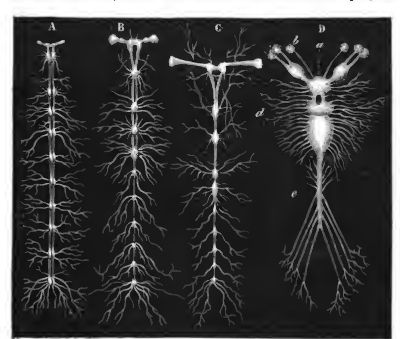


Fig. 31 — Système nerveux des Insectes[1]

trouve ainsi entouré par une sorte d'anneau dont nous venons de parler sous le nom de *collier œsophagien;* puis, dans chaque segment de corps existent deux ganglions, un de chaque côté de la ligne médiane. Mais, à mesure que l'organisme se perfectionne, le système nerveux tend à se

[1] A système nerveux d'un forficule (perce-oreille). — B système nerveux d'une sauterelle. — C système nerveux d'un lucane cerf-volant. — D système nerveux d'une punaise des bois. — *a* ganglions cérébroïdes soudés. — *b*, *c* nerfs des yeux. — *d* ganglions thoraciques. — *e* ganglions abdominaux.

concentrer par la soudure d'un nombre plus ou moins grand de ganglions en une seule masse (*fig.* 31, B, C, D). Ainsi, chez la pentatome grise, ou punaise des bois (*fig.* 31, D), arrivée à son état parfait, au lieu de la longue suite de petits ganglions que l'on trouvait chez sa larve, on voit que la plupart de ces petits corps se sont réunis pour former un cerveau et des centres nerveux considérables, d'où partent de longs filets qui se ramifient dans les différentes parties du corps.

95. *Crustacés.* — Le système nerveux des crustacés est construit sur le même plan que celui des insectes, et suit les mêmes procédés de perfectionnement. Chez quelques-uns, la chaîne ganglionnaire s'étend uniformément d'une extrémité du corps à l'autre, fournissant deux ganglions par anneau; mais, chez les animaux de cette classe les plus élevés en organisation, tous ces ganglions post-œsophagiens se fondent en une seule masse, placée dans le thorax; c'est ce qui se remarque chez certains crabes.

96. *Vers.* — Chez les annélides, on trouve une chaîne ganglionnaire, tantôt double, tantôt simple, et résultant alors de l'accolement sur la ligne médiane des deux ganglions latéraux.

97. *Mollusques.* — Chez les mollusques, le système nerveux se compose d'un petit nombre de ganglions réunis entre eux par des connectifs, mais disposés sur un tout autre plan que celui des articulés; cependant on y retrouve toujours le collier œsophagien, formé par les filets nerveux qui relient les ganglions cérébraux placés au-dessus du tube intestinal aux autres ganglions placés au-dessus de ce tube.

98. *Zoophytes.* — Chez les zoophytes, le système nerveux existe quelquefois, mais est alors presque rudimentaire; le plus souvent il paraît manquer complétement.

99. **Usages du cerveau.** — En étudiant les différents groupes du règne animal, on a remarqué que l'intelligence était en raison directe du développement des hémisphères du cerveau et des circonvolutions qui les couvrent et en augmentent la surface. D'après ce fait, on a regardé les hémisphères comme le siége des facultés intellectuelles et de la mémoire; les expériences de Ch. Bell, de Magendie et de M. Flourens confirment cette opinion. Ce dernier observateur, ayant enlevé les hémisphères cérébraux d'un oiseau, remarqua que l'animal perdait toute spontanéité dans les mouvements. — Sur les mammifères, les résultats obtenus étaient les mêmes, et en enlevant les hémisphères, on enlevait à l'animal l'*initiative*, la *spontanéité* et la *mémoire*. — La substance cérébrale est par elle-même complétement insensible : on peut la couper et la déchirer sans que l'animal en ait aucune conscience. Dans certaines maladies, on a été obligé de retrancher des parties du cerveau, et cela sans que les malades souffrissent aucunement.

Un hémisphère cérébral peut cependant être détruit tout entier sans que les facultés intellectuelles s'en ressentent d'une manière appréciable.

D'après un observateur dont les idées eurent pendant quelque temps une grande vogue, chaque circonvolution cérébrale devrait être considérée comme un organe particulier, siége de l'une des facultés de notre intelligence. Il y aurait eu ainsi la circonvolution de la mémoire, celle du vol, celle du meurtre, etc. Pensant que le crâne se moulait exactement sur le cerveau, Gall en était arrivé à dire que, par l'examen des saillies de la boîte crânienne, on pouvait arriver à juger des facultés, des inclinations et même du caractère des hommes. L'observation n'a pas confirmé ces vues de l'esprit ; on a remarqué que les bosses du crâne ne correspondent pas exactement à des saillies du cerveau, et la science actuelle range la phrénologie ou craniologie à côté de l'astrologie et de l'alchimie.

100. **Usages du cervelet.** — Le cervelet paraît destiné à régler et à coordonner les mouvements. Si on enlève cet organe par couches successives, l'ablation des premières couches est suivie d'un peu de faiblesse et de désharmonie dans les mouvements. Aux couches moyennes, il se manifeste une agitation générale, mais sans convulsions ; l'animal voit et entend, mais exécute des mouvements brusques et déréglés. Quand on arrive aux dernières couches, l'animal perd la faculté de marcher ou de voler, de rester debout ou en équilibre ; placé sur le dos, il s'agite sans pouvoir se relever : il voit le corps qui le menace, mais ne peut l'éviter ; donc la volonté, le sentiment et la conscience persistent, la *coordination des mouvements* est abolie.

101. **Usages de la moelle allongée et de la moelle épinière.** — La moelle allongée présente une grande importance physiologique ; en effet, on peut enlever le cerveau et le cervelet d'un animal sans le tuer, mais si on arrive à piquer un point spécial de la moelle allongée, l'animal meurt comme foudroyé. M. Flourens a déterminé exactement la position de ce point et lui a donné le nom de *nœud vital.*

La moelle épinière peut être considérée comme le conducteur du principe nerveux, elle conduit la volonté du centre à la périphérie, et ramène les sensations de la périphérie aux centres. Si on lie la moelle épinière, on abolit la sensibilité des parties placées au-dessous de la ligature, les parties situées au-dessus continuent à sentir et à se mouvoir.

102. **Usages des nerfs.** — Les nerfs sont également des conducteurs. Si on détruit les nerfs qui se rendent à une partie du corps, cette partie sera paralysée, elle ne sentira plus et ne pourra exécuter aucun mouvement.

103. **Nerfs moteurs et sensitifs.** — Nous avons vu que chaque nerf naissait de la moelle épinière par deux racines, l'une partant des faisceaux postérieurs, l'autre des faisceaux antérieurs. Chacune de ces racines a des fonctions particulières, la première est chargée de transmettre la sensibilité, l'autre la volonté. Si l'on coupe la racine postérieure seule d'un nerf, toute la partie animée par ce nerf ne sentira plus. Mais ce

membre pourra agir sous l'influence de la volonté, et les muscles se contracteront ; si, au contraire, on coupe la racine antérieure, la partie animée par ce nerf ne pourra exécuter aucun mouvement, mais elle sera sensible à toutes les impressions extérieures.

La force motrice se propage toujours en suivant la direction des fibres primitives des nerfs du centre vers la circonférence. Si, par exemple, on pique ou on excite le nerf se rendant à la jambe d'une grenouille, toute la portion placée au delà du point piqué se contractera; plus haut, au contraire, il n'y aura pas de mouvement.

Si l'on pique un nerf, on rapportera le sentiment de la douleur aux parties auxquelles ce nerf se distribue. Ce fait explique pourquoi les amputés se plaignent souvent de douleur dans les doigts du pied ou de la main qu'ils n'ont plus ; cela tient à ce que le tronc nerveux dont les branches se distribuaient aux doigts est excité, soit par la compression, soit par une autre cause.

104. **Nerfs du grand sympathique.** — Les nerfs du grand sympathique agissent sur les organes de la vie de nutrition, sans que nous en ayons aucune conscience. Les mouvements des intestins, de l'estomac, la sécrétion des humeurs par les glandes, la contractilité des vaisseaux sanguins est placée sous la dépendance du système grand sympathique. M. Cl. Bernard a remarqué que si l'on coupe les filets du grand sympathique, les vaisseaux sanguins se dilataient beaucoup dans toute la partie où se rendaient ces nerfs ; la chaleur animale y augmentait, et quelquefois même il s'y manifestait des phénomènes inflammatoires; ces phénomènes sont dus à ce que par cette opération on avait détruit les nerfs qui présidaient à la contractilité des artères et des veines.

Les nerfs du grand sympathique sont complétement insensibles, on peut les piquer et les déchirer sans que l'animal en ait conscience ; les nerfs de la vie de relation sont au contraire d'une sensibilité exquise.

ORGANES DES SENS

Organes du toucher, du goût, de l'odorat, de l'ouïe, de la vue. — Fonctions de leurs parties essentielles. — De la voix, organe producteur des sons.

Après avoir examiné le système nerveux, nous devons étudier quelles sont les sensations qu'il est destiné à percevoir et à transmettre au cerveau, on admet ordinairement cinq sortes de sens : 1° le *toucher*, 2° le *goût*, 3° l'*odorat*, 4° l'*ouïe*, 5° la *vue*.

SENS DU TOUCHER.

105. — Le toucher est le sens fondamental et peut-être même le sens unique. En effet, si notre œil peut voir, c'est qu'il est conformé de manière à pouvoir toucher la lumière; si notre oreille entend, c'est qu'elle

peut toucher les ondes sonores. Ce sont donc là des modifications du sens du toucher.

La sensibilité tactile telle qu'elle existe dans les différentes parties de la surface de notre corps suffit pour nous faire juger de la consistance, de la température et de quelques autres propriétés des corps qui se mettent en contact avec nous; dans quelques cas, c'est une sensation obtuse désignée sous le nom de *tact*; d'autres fois, les parties douées de cette sensibilité jouent un rôle plus complet; des mouvements soumis à l'influence de la volonté nous permettent de multiplier et de varier les points de contact avec les objets extérieurs; on donne alors à ce sens le nom de *toucher*.

Ces parties plus sensibles sont en général les mains et surtout les doigts et quelquefois les lèvres. C'est par l'intermédiaire de la peau que cette faculté s'exerce.

106. **Structure de la peau.** — La peau qui enveloppe complétement le corps se compose de deux couches : 1° l'*épiderme*, 2° le *derme*.

L'épiderme est la couche la plus superficielle, c'est une sorte de vernis organisé qui recouvre le derme; cette couche est par elle-même complétement insensible, elle est formée d'utricules dont les plus superficielles se dessèchent et dans certains cas ressemblent à de petites écailles. La couche profonde est au contraire molle, et les utricules dont elle se compose contiennent la matière pigmentaire de la peau. Certains anatomistes ont considéré cette couche profonde comme étant une membrane particulière qu'ils désignaient sous le nom de réseau muqueux de la peau ou réseau de Malpighi.

L'épiderme est percé d'un grand nombre de petites ouvertures appelées pores, qui livrent passage à la sueur, liquide secrété par de petites glandes placées sous l'épiderme. Les saillies qu'on y voit correspondent aux papilles du derme. L'épiderme peut acquérir une épaisseur considérable, lorsqu'il est exposé à des frottements repétés; l'on sait que l'épiderme de la plante des pieds et de la paume des mains offre chez certaines personnes une épaisseur assez grande pour leur permettre de prendre et de retenir quelques instants des charbons ardents. Mais alors la sensibilité tactile est très-obtuse; au contraire, là ou elle est bien développée, comme au bout des doigts, aux lèvres, aux paupières, l'épiderme est très-mince.

Le *derme* se présente sous la forme d'une membrane assez épaisse, très-souple et d'une grande ténacité. Un grand nombre de nerfs s'y ramifient et se rendent dans de petites saillies appelées papilles de la peau. C'est par l'intermédiaire de ces saillies que la sensibilité s'exerce.

Lorsque l'épiderme a été enlevé soit par une brûlure soit par un vésicatoire ou une ampoule, on voit parfaitement ces petites éminences disposées régulièrement et douées d'une sensibilité exquise.

107. **Poils**. — C'est dans l'épaisseur et au-dessous du derme que sont logées les racines des poils, elles sont constituées par une petite capsule en cul-de-sac, à la partie inférieure de laquelle existe une petite papille; de chaque côté on voit des glandules destinées à sécréter une matière grasse dont le poil se trouve ainsi enduit.

Les poils peuvent acquérir des dimensions considérables et former alors les piquants du porc-épic et du hérisson, ils peuvent en se soudant ensemble constituer les larges écailles qui recouvrent le corps des tatous et des pangolins.

La corne qui arme le nez du Rhinocéros, les cornes persistantes des ruminants tels que les bœufs, les antilopes, les moutons, etc., sont formées aussi par des poils agglutinés. Les ongles sont des organes du même genre.

108. **Organes du toucher chez les différents animaux**. — Les organes où la sensibilité tactile est le plus développée, varient suivant les animaux : chez l'homme et le singe ce sont les mains, chez les chevaux ce sont les lèvres, chez l'éléphant la trompe, chez les insectes et les crustacés ce rôle paraît dévolu aux antennes, chez les mollusques ce sont les tentacules.

La sensibilité tactile nous permet de juger de la consistance des corps, de leur grosseur, etc. Elle vient en aide au sens de la vue, et quand celui-ci fait défaut le tact se perfectionne.

SENS DU GOUT.

109. — Le sens du goût nous donne la perception des saveurs; il paraît exister chez tous les animaux, puisque chaque espèce recherche et reconnaît les aliments qui lui conviennent et ne s'y trompe point. Chez l'homme, la *langue* est le siége principal de ce sens. Cet organe placé dans la bouche est formé par un grand nombre de muscles enlacés; il est recouvert d'une membrane muqueuse; à sa surface se remarquent des papilles dans lesquelles se ramifient les filets du nerf lingual; c'est ce nerf qui est chargé de percevoir les saveurs, il ne sert qu'à cet usage, et il naît du nerf de la 5e paire. Un autre appelé nerf hypoglosse est chargé de présider aux mouvements de la langue.

Toutes les substances n'agissent pas sur les organes du goût, les unes sont très-sapides, d'autres ne le sont que peu ou pas; on a remarqué que les corps insolubles n'avaient aucune saveur, la dissolution paraît donc être une condition nécessaire pour qu'une matière puisse agir sur le goût.

SENS DE L'ODORAT.

110. **Fosses nasales**. — Le sens de l'odorat paraît exister chez la plupart, sinon chez tous les animaux. On sait que l'odeur de la viande et des matières en putréfaction attire de très-loin des mouches, des crus-

tacés, etc. L'odorat semble même les guider pour le choix de leurs aliments; mais on ne sait encore exactement quel est chez ces animaux le siége de ce sens. Chez l'homme, il s'effectue à l'aide des *fosses nasales* (*fig.* 32), situées sur le passage de l'air qui se rend aux organes respiratoires de façon à être continuellement mises en contact avec les particules odorantes suspendues dans l'air. Elles communiquent avec l'extérieur par deux ouvertures placées au-dessus de la bouche et nommées narines, et sont revêtues par une membrane muqueuse d'une grande délicatesse appelée *membrane pituitaire*, dont la surface est augmentée par un certain nombre de replis ou *cornets* formés par des lames osseuses dans l'intérieur des fosses nasales, et par des cavités ou sinus creusées dans l'épaisseur des os du front, de la mâchoire supérieure, etc. Enfin les fosses nasales débouchent en arrière du voile du palais, dans le pharynx. La membrane pituitaire reçoit des filets nerveux émanant de la première paire de nerfs crâniens ou nerfs olfactifs; ces filets très-nombreux passent à travers de petits pertuis d'une portion de l'os ethmoïde nommée pour cette raison *lame criblée*.

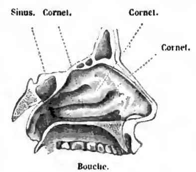


Fig. 32. — Fosses nasales.

Le sens de l'odorat médiocrement développé chez l'homme se perfectionne beaucoup chez certains mammifères tels que le chien, le renard, l'ours, etc. Dans ce cas, les cornets du nez prennent un plus grand accroissement et par ce fait, la surface de la membrane pituitaire est augmentée.

Chez certains animaux tels que l'éléphant, le tapir, le desman, le nez se développe beaucoup et s'allonge en une trompe.

Chez les mammifères aquatiques, le larynx peut remonter et s'appliquer contre l'ouverture postérieure des fosses nasales, de façon à permettre à la respiration de s'effectuer pendant que la bouche de l'animal est pleine d'eau.

La membrane pituitaire doit être continuellement humide, autrement l'on n'aurait aucune perception des odeurs. Aussi voit-on dans son épaisseur une quantité de follicules muqueux.

Le sens de l'odorat est lié de la façon la plus intime au sens du goût, il n'est personne qui n'ait remarqué combien ce dernier devenait obtus lors du rhume de cerveau, maladie qui consiste en un gonflement avec hypersécrétion de la membrane pituitaire.

SENS DE L'OUIE.

111. — Le sens de l'ouïe existe chez les invertébrés comme chez les vertébrés, et chez les animaux aquatiques, aussi bien que chez les animaux aériens. Il est de toute évidence que les insectes entendent, mais on ignore où réside le siége de ce sens. Chez les mollusques et chez certains annelés, on trouve des organes de l'ouïe rudimentaires, et consistant en une capsule fibreuse, pleine de liquide, où flottent de petits corpuscules solides, et à la surface de laquelle vient se rendre un nerf partant des ganglions voisins.

Chez l'homme, l'oreille, quoique d'une petitesse extrême, présente une grande complication. Cet organe est logé presque en entier dans l'épaisseur d'une saillie osseuse qui constitue la partie de l'os temporal appelée *rocher*. On divise l'appareil de l'audition en trois parties : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne.

112. **Oreille externe.** — L'oreille externe (*fig.* 33) se compose du pavillon et du conduit auriculaire. Le *pavillon* est formé par une lame cartilagineuse, repliée ou enroulée sur elle-même, qui s'élargit en avant pour former la *conque;* la forme de cette partie varie suivant les animaux. Quelquefois elle peut manquer complétement, comme chez les oiseaux, les reptiles, etc.; d'autres fois elle est très-développée et constitue une sorte de cornet, comme chez les ruminants, les carnassiers, etc. De petits faisceaux musculaires lui permettent d'exécuter certains mouvements. Le conduit auditif s'enfonce dans l'os temporal; la peau qui le revêt est percée de nombreux pertuis qui débouchent dans des follicules sébacés, chargés de sécréter une humeur particulière épaisse et jaunâtre, nommée *cérumen*.

113. **Oreille moyenne.** — Le conduit auriculaire est terminé en cul-de-sac par une membrane bien tendue, qui le sépare de l'oreille moyenne (*fig.* 33); cette membrane, appelée *tympan*, est mince, transparente, et sert à recevoir et à transmettre les vibrations des ondes sonores à la caisse du tympan, cavité étroite, communiquant avec le pharynx ou arrière-bouche par un canal nommé *trompe d'Eustache*. Ce conduit permet à l'air extérieur de s'introduire dans la caisse du tympan. — A la partie la plus profonde de la caisse se voient deux autres ouvertures fermées par une membrane tendue; l'une est ovale, l'autre ronde; aussi les appelle-t-on *fenêtre ovale* et *fenêtre ronde;* elles communiquent avec l'oreille interne.

Une chaîne de petits osselets s'étend de la fenêtre ovale à la membrane du tympan (*fig.* 34); ces osselets sont mus par de petits muscles, et peuvent ainsi tendre ou relâcher les membranes sur lesquelles ils s'appuient. Ces osselets sont au nombre de quatre. On désigne le premier, qui s'appuie sur le tympan, sous le nom de *marteau;* le second sous le nom

d'*enclume ;* le troisième, appelé *os lenticulaire*, s'appuie sur l'*étrier*, qui lui-même est en contact avec la fenêtre ovale. — Cette chaîne d'osselets

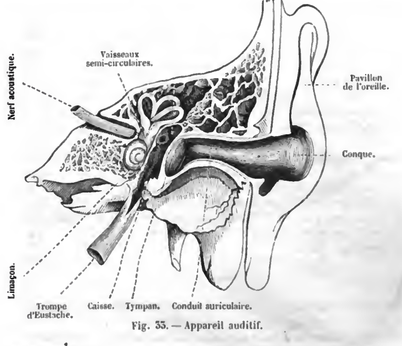


Fig. 33. — Appareil auditif.

transmet ainsi les vibrations de la membrane du tympan à la fenêtre ovale, c'est-à-dire à l'oreille interne.

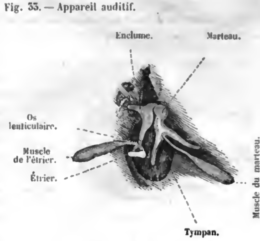


Fig. 34. — Caisse du tympan.

114. Oreille interne. — Cette dernière partie (*fig*. 33) se compose du vestibule, des canaux semi-circulaires et du limaçon.

Le *vestibule* est situé au milieu; les canaux semi-circulaires et le limaçon y débouchent, les premiers en dessous, l'autre en

dessus. Il communique avec la caisse du tympan par la fenêtre ovale, et il est rempli par un liquide.

Les *canaux semi-circulaires* sont au nombre de trois, et contiennent le même liquide que le vestibule.

Le *limaçon*, ainsi nommé à cause de sa forme enroulée sur lui-même, est divisé par une cloison intérieure en une sorte de double canal ; il est rempli par un liquide, et communique avec la caisse du tympan. — Les nerfs de la huitième paire ou nerfs acoustiques se ramifient dans l'oreille interne.

Comme on le sait, le son résulte d'un mouvement vibratoire qu'éprouvent les corps sonores. Ces vibrations se transmettent à l'air, sont recueillies par la conque de l'oreille, qui les dirige par le conduit auriculaire jusqu'à la membrane du tympan ; cette membrane entre alors en vibration. A l'aide de la chaîne d'osselets dont nous avons parlé, elle peut se tendre ou se relâcher de façon à vibrer plus ou moins facilement, suivant l'intensité des sons qui la frappent. L'air contenu dans la caisse du tympan vibre à son tour, et transmet les vibrations à l'oreille interne par l'intermédiaire des fenêtres ovale et ronde. C'est dans cette partie que se rendent les nerfs qui doivent porter au cerveau les impressions reçues.

SENS DE LA VUE.

115. — Le sens de la vue est celui à l'aide duquel nous percevons la lumière, et il s'effectue par l'intermédiaire de l'œil.

116. **Structure de l'œil des mammifères.** — Chez l'homme et chez les animaux supérieurs, l'œil est d'une assez grande complication (*fig.* 35). C'est un globe enveloppé de membranes épaisses et opaques, au nombre de trois. L'extérieure, de nature fibreuse, blanche et opaque, porte le nom de *sclérotique*, et est connue vulgairement sous le nom de *blanc de l'œil*. Chez l'homme, elle est flexible, mais chez d'autres animaux, tels que les oiseaux, les chéloniens, les sauriens, elle a de la tendance à s'ossifier et à constituer un anneau de petites

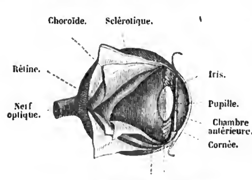


Fig. 35. — Globe de l'œil.

lames osseuses. A sa partie antérieure se voit une ouverture circulaire dans laquelle est enchâssée comme un verre de montre la *cornée transparente*, membrane, comme son nom l'indique, parfaitement transparente.

La deuxième membrane de l'œil porte le nom de *choroïde;* elle est chargée de matière pigmentaire et adhère à la face interne de la sclérotique. Au point où celle-ci se joint à la cornée, elle forme un cercle connu sous le nom de ligament ciliaire; à la partie antérieure de l'œil, elle se tend derrière la cornée et constitue un diaphragme nommé *iris;* le trou dont il est percé s'appelle *pupille.* L'iris varie de couleur suivant les individus; il peut se contracter ou se relâcher, et rend ainsi la pupille plus ou moins large, de façon à empêcher ou faciliter l'entrée des rayons lumineux. Ainsi, la pupille est-elle très-petite lorsque la lumière est vive, tandis qu'elle se dilate beaucoup le soir ou dans les lieux obscurs.

La troisième membrane de l'œil porte le nom de *rétine;* elle peut être considérée comme l'épanouissement du nerf optique après son passage à travers la sclérotique et la choroïde. Elle est semi-transparente et molle, et elle s'interrompt au voisinage de la cornée.

L'espace compris entre la cornée transparente et l'iris est rempli par l'*humeur aqueuse,* et porte le nom de chambre antérieure de l'œil.

En arrière de l'iris, la choroïde forme un grand nombre de replis désignés sous le nom de *procès ciliaires;* les extrémités de ces replis interceptent un espace circulaire destiné à loger le *cristallin,* contenu dans une capsule membraneuse parfaitement diaphane; sa forme est circulaire, et il ressemble à une lentille biconvexe; la dureté des couches qui le composent augmente de la circonférence au centre.

L'espace compris entre l'iris d'un côté, le cristallin et les procès ciliaires de l'autre, porte le nom de chambre postérieure de l'œil; elle est également remplie par l'humeur aqueuse. Enfin, dans toute la partie postérieure de l'œil, derrière le cristallin, se trouve une humeur parfaitement transparente, nommée *humeur vitrée,* contenue dans des cellules d'une ténuité extrême.

117. **Parties accessoires.** — Le globe de l'œil est logé dans l'orbite, cavité creusée dans les os du crâne et de la face; cette cavité est beaucoup plus grande que l'œil, de façon à permettre à celui-ci de s'y mouvoir facilement, et à contenir un amas de graisse qui sert de coussinet à cet organe.

118. *Muscles de l'œil.* — Les muscles qui mettent l'œil en mouvement sont au nombre de six : quatre servent à porter l'œil en haut, en bas, à gauche et à droite; deux sont affectés au mouvement de rotation. Ils s'insèrent d'une part sur la sclérotique, d'autre part à la partie postérieure des os de l'orbite.

119. *Paupières.* — En avant, l'œil est recouvert par une membrane nommée conjonctive ; c'est une continuation de la peau qui s'étend au-devant du globe oculaire, après avoir formé deux replis, l'un supérieur, l'autre inférieur, connus sous le nom de paupières ; la partie interne seule est modifiée, et porte le nom de ***conjonctive***. Ces deux voiles sont destinés à protéger l'œil, et sont mis en mouvement par des muscles particuliers. Le bord libre des paupières est garni de poils, désignés sous le nom de ***cils***, qui servent à arrêter les corps étrangers qui pourraient venir blesser la cornée. D'autres poils, nommés ***sourcils***, et implantés dans la peau sur une saillie nommée arcade sourcillière, servent à empêcher la sueur qui coule du front d'arriver sur l'œil.

120. *Glandes lacrymales.* — Enfin un liquide est continuellement versé au-devant de l'œil. — Ce liquide, connu sous le nom de ***larmes***, est sécrété par une glande située sous la voûte de l'orbite, au-dessus du globe de l'œil, et désignée sous le nom de glande lacrymale. Le liquide sécrété est versé au dehors par six ou huit canaux qui s'ouvrent au bord externe de la paupière supérieure ; il se répand ainsi uniformément au-devant de l'œil ; une partie s'évapore, l'autre se rend à l'angle interne de l'œil et de là coule dans les fosses nasales en traversant le ***canal*** et le ***sac lacrymal***. Le canal lacrymal débouche par deux orifices (***points lacrymaux***) à l'angle interne de l'œil, près de la caroncule lacrymale ; l'un est situé à la paupière inférieure, l'autre à la paupière supérieure ; les canaux lacrymaux débouchent dans le sac lacrymal, qui se vide dans les narines, au-dessous du cornet inférieur. Lorsque des émotions vives, ou une cause accidentelle augmentent la sécrétion lacrymale, les larmes coulent en plus grande abondance dans les fosses nasales ; enfin, si leur sécrétion est plus abondante, elles débordent les paupières et coulent sur les joues.

Si maintenant on examine l'œil des autres animaux, on trouve des modifications importantes.

121. **Œil des oiseaux**. — Chez les oiseaux, l'œil est plus volumineux que chez les mammifères. La sclérotique s'est ossifiée en avant autour de la cornée, de façon à constituer un anneau solide. Dans l'intérieur de l'œil on voit une partie surajoutée : c'est une membrane plissée qui traverse l'humeur vitrée ; elle porte le nom de ***peigne de l'œil***. Enfin, on observe chez ces animaux une troisième paupière à l'angle interne de l'œil.

122. **Yeux des articulés**. — Chez les animaux articulés, on distingue deux sortes d'yeux : 1° les yeux simples ou lisses ; 2° les yeux composés. — Les premiers, constitués par une cornée dont la face postérieure est enduite de pigment, sont en nombre variable.

Les autres sont formés par la réunion d'un grand nombre d'yeux simples ; aussi leur surface semble composée d'une foule de petites facettes.

123. **Mécanisme de la vision**. — L'œil des animaux supérieurs

peut se comparer à l'instrument d'optique connu des physiciens sous le nom de chambre noire. — On sait, en effet, que si, dans une chambre complétement obscure, on laisse passer un rayon lumineux par une ouverture devant laquelle on aura mis une lentille, on verra se former au foyer de cette lentille une image renversée des objets d'où venaient les rayons lumineux. L'œil est admirablement conformé à cet effet. Il se compose d'un globe complétement obscur, percé en avant d'un trou, la pupille, derrière lequel se trouve le cristallin, qui joue le rôle de lentille ; enfin les images viennent se former sur une membrane nerveuse impressionnable, la rétine. Des rayons lumineux qui viennent frapper l'œil, une partie se réfléchit sur la cornée, l'autre traverse cette membrane, et comme sa densité est supérieure à celle de l'air, ils se rapprochent d'autant plus de la perpendiculaire, que la surface en est plus convexe. La densité de l'humeur aqueuse est également supérieure à celle de l'air, de sorte que les rayons lumineux convergent vers la pupille ; celle-ci, en se dilatant ou en se resserrant, règle la quantité de lumière qui doit arriver dans l'œil ; le soir elle se dilate beaucoup, le jour, et surtout au soleil, elle se contracte de façon à ressembler, soit à une simple fente (chat), soit à un petit trou (homme). Les rayons lumineux tombent alors sur le cristallin, organe qui réunit au plus haut degré les propriétés d'une lentille achromatique, et sert à réunir ces rayons sur la rétine, où ils viennent former une image renversée des objets, que nous croyons cependant apercevoir redressés. On a cherché à expliquer ce phénomène sans y arriver encore d'une manière satisfaisante.

Certaines personnes ne peuvent voir que les objets éloignés, ce qui dépend d'un défaut de convergence dans les faisceaux lumineux qui traversent l'œil ; ce vice, connu sous le nom de presbytisme, peut se corriger en employant des verres convexes, qui tendent à suppléer au défaut de convergence des rayons. — Les myopes ne voient, au contraire, que les objets très-rapprochés, ce qui tient à ce que l'œil est trop réfringent, et que les rayons lumineux convergent trop fortement, de façon à se croiser avant d'arriver sur la rétine. On peut remédier à cet inconvénient en employant des lentilles concaves.

Nous jugeons de la position des objets par la direction des rayons lumineux et nous les plaçons dans leur prolongement. Nous apprécions leur grandeur par l'angle que font ces rayons. Aussi, plus nous sommes éloignés d'un objet, plus il nous paraît petit ; plus nous nous rapprochons, plus il grandit. — Nous parvenons à juger des distances à l'aide de la grandeur apparente des objets que nous connaissons, et par leur netteté. Aussi, lorsqu'on se trouve dans un air très-pur, se trompe-t-on continuellement sur l'évaluation des distances. Enfin, nous constatons qu'un objet se meut, parce que la direction des rayons qui en émanent change et affecte successivement différents points de la rétine.

VOIX.

124. — A la suite des organes des sens nous devons étudier le mécanisme à l'aide duquel nous produisons les sons qui peuvent nous mettre en rapport avec le monde extérieur. L'homme seul jouit de la parole, les autres animaux n'émettent que des sons; c'est à l'aide du larynx que ces phénomènes se produisent.

125. **Larynx.** — Le *larynx* est un tuyau court placé à la partie supérieure de la trachée-artère de façon à être traversé par l'air qui se rend aux poumons ou qui en sort; il forme au-devant du cou une saillie appelée vulgairement pomme d'Adam. Ses parois sont formées de cartilages auxquels on a donné divers noms. Les cartilages ***thyroïdes*** sont placés latéralement et se réunissent en avant sur la ligne médiane; les cartilages ***aryténoïdes*** sont situés en arrière; le cartilage ***cricoïde*** est très-petit et compris entre la trachée et la partie inférieure du larynx. L'intérieur du larynx est tapissé par une membrane muqueuse qui forme un certain nombre de replis, disposés comme les lèvres d'une boutonnière; ils sont appelés ***cordes vocales*** ou ligaments inférieurs de la glotte; à l'aide des mouvements des cartilages ils peuvent se tendre ou se relâcher. Au-dessus des cordes vocales, se trouvent deux autres replis analogues appelés ***ligaments supérieurs de la glotte;*** entre les ligaments inférieurs et les ligaments supérieurs existent deux enfoncements qui portent le nom de ***ventricules du larynx.*** On désigne sous le nom de ***glotte*** l'espace compris entre ces quatre replis; au-dessus de la glotte se trouve l'***épiglotte,*** sorte de petite soupape cartilagineuse, attachée au bord antérieur de la face interne du cartilage thyroïde; elle peut en s'abaissant fermer l'entrée du larynx.

126. Chez certain mammifères le larynx est pourvu de cavités accessoires servant au renforcement des sons; les singes hurleurs présentent cette disposition. Chez les oiseaux l'organe vocal est double; il existe deux larynx; l'un d'eux se trouve comme chez les mammiféres à l'entrée de la trachée-artère, l'autre est situé à la partie inférieure de ce tube audessus de l'origine des bronches. C'est ce dernier qui sert à produire les sons, le larynx supérieur sert à les moduler. Aussi lorsque l'on coupe le cou d'un oiseau peut-il continuer à crier à l'aide de son larynx inférieur.

127. Galien, médecin célèbre de l'antiquité, démontra le premier que c'est dans le larynx que se produisent les sons; il reconnut que si l'on coupe les nerfs qui se rendent à cet organe, l'animal sur lequel on fait l'opération ne peut plus se faire entendre. On a reconnu depuis que ce sont surtout les cordes vocales qui agissent pour la production des sons, en se rapprochant et en s'écartant rapidement de façon à entrer en vibra-

tion rapide ; plus les cordes vocales présentent de longueur, plus les vibrations seront lentes, et par conséquent plus le son sera grave ; quand, au contraire, ces cordes sont courtes les sons sont aigus. Le pharynx, les fosses nasales et la langue modifient les sons et servent à la prononciation.

MOUVEMENTS

Muscles. — Leur structure et leur mode d'insertion. — Composition du squelette.

SYSTÈME MUSCULAIRE.

128. — Nous avons vu que la faculté d'exécuter des mouvements autonomiques était propre au règne animal. Ces mouvements s'exercent à l'aide de *muscles* qui agissent sur des pièces et des leviers solides, portant tantôt le nom d'os, tantôt celui d'écaille, de coquille, de cartilage.

129. **Muscles.** — Les muscles sont formés par des faisceaux de fibres primitives, rangées à côté les unes des autres, qui, vues au microscope, semblent souvent être formées d'une série de disques empilés.

La propriété caractéristique de chacune de ces fibres est de pouvoir se contracter, c'est-à-dire se raccourcir sous l'influence de la volonté ou de quelque cause excitante ou irritante.

Les muscles régis par la volonté reçoivent des nerfs de l'axe cérébro-spinal, tandis que ceux dont la contraction s'opère indépendamment de nous, et sans que nous en ayons conscience, reçoivent des filets du grand sympathique ou système ganglionnaire ; vues à un fort grossissement, ces fibres présentent des différences ; celles qui sont sous l'empire de la volonté ont un aspect strié, tandis que les autres sont lisses.

Les muscles sont composés surtout de fibrine ; chez les animaux supérieurs ils ont une couleur rouge intense, due au sang qui les imprègne, leur teinte propre est cependant blanchâtre, comme on peut s'en assurer en enlevant le sang par des lavages ou la macération, ou bien encore en examinant le tissu musculaire d'animaux à sang incolore ; celui des crustacés par exemple. L'on voit que chez l'écrevisse, le homard, la masse des muscles est complétement blanche.

130. **Tendons et aponévroses.** — Les fibres musculaires ne s'insèrent généralement pas directement sur les pièces solides du squelette ; elles se terminent par une extrémité fibreuse, blanche, nacrée et résistante qui vient se fondre avec le périoste qui entoure les os. Cette partie porte le nom de *tendon* lorsqu'elle est allongée et peu élargie, et celui d'*aponévrose* lorsqu'elle est large et aplatie en forme de lame.

Quand un muscle se contracte il se raccourcit et, par conséquent,

tend à rapprocher ses deux points d'attache ; lorsque l'un de ces points est fixe, l'autre seul est mis en mouvement.

La force d'action des muscles dépend : 1° de leur grosseur ; 2° de leur mode d'insertion. Ainsi un muscle agira d'une manière d'autant plus puissante qu'il sera inséré moins obliquement sur un os, et le maximum d'action sera obtenu lorsque le muscle s'insérera à angle droit. En effet, dans ce cas il n'y a pas de perte de force.

La longueur du bras de levier exerce aussi une grande influence sur la puissance musculaire ; en effet, la distance qui sépare le point d'insertion d'un muscle du point d'appui sur lequel se meut l'os, et de l'extrémité opposée du levier que cet organe représente, influe beaucoup sur sa puissance d'action.

On distingue parmi les muscles :

Les *fléchisseurs* qui déterminent la flexion d'un os sur un autre.

Les *extenseurs* qui, au contraire, redressent l'os.

Les *rotateurs* qui produisent les mouvements de rotation.

Les *abducteurs* qui écartent l'os.

Les *adducteurs* qui les rapprochent.

Il y a en général un certain nombre de muscles qui concourent à un même but, et un autre système de muscles destinés à opposer leur action et à rétablir le membre dans son premier état ; on les nomme muscles *antagonistes*.

Les muscles tirent en général leur nom, soit de leur forme, soit de leurs points d'insertion, soit de leurs usages.

Chez la plupart des vertébrés les muscles enveloppent le squelette, et sont situés sous la peau. Chez presque tous les invertébrés ainsi que chez les chéloniens, le squelette est extérieur et l'appareil musculaire intérieur.

SYSTÈME OSSEUX.

131. **Vertébrés**. — Chez les vertébrés le squelette est formé par la réunion d'un certain nombre de pièces solides qui restent quelquefois à l'état cartilagineux ; mais en général s'encroûtent de sels calcaires et constituent des os. Ces os sont formés d'une matière animale analogue à la gélatine et connue sous le nom d'*osséine* et de phosphate et de carbonate de chaux. Le premier de ces sels est beaucoup plus abondant que l'autre. Les os se développent par plusieurs centres nommés points d'ossification. Dans les os longs les extrémités connues alors sous le nom d'*épiphyses* restent longtemps distinctes du corps de l'os.

D'après leur forme on divise les os en os longs, os courts et os plats. Les premiers se présentent en général sous la forme d'un cylindre creux à l'intérieur et rempli d'une matière graisseuse, la *moelle*. Cette substance manque dans les os des oiseaux où la cavité intérieure ou médullaire est

remplie par de l'air (voy. parag. 63). On remarque souvent à la surface des os, des saillies plus ou moins volumineuses nommées *apophyses* et destinées à donner attache aux muscles.

Les os sont entourés d'une membrane fibreuse et vasculaire, le *périoste* qui joue un rôle important dans la production du tissu osseux. En effet, si on enlève un os en laissant cette membrane intacte, la partie enlevée ne tardera pas à se reproduire. Le périoste paraît donc jouir de la propriété d'engendrer le tissu osseux. Les facettes articulaires sont arrondies, entourées de ligaments puissants destinés à empêcher les têtes d'os de se déplacer et à limiter leurs mouvements ; de plus une membrane fine et délicate les revêt ; elle sécrète une humeur appelée *synovie* qui sert à faciliter les glissements.

132. *Articulations.* — Les os s'articulent entre eux de diverses manières. Tantôt ils ne peuvent exécuter aucun mouvement. Les os du crâne sont dans ce cas, ils sont alors réunis par des sutures dont la forme varie. D'autres fois les articulations sont mobiles ; celles des vertèbres le sont à peine et les mouvements s'exécutent par le jeu des cartilages intermédiaires (*articulation par continuité*). Les membres sont au contraire susceptibles de mouvements très-étendus. Les os simplement juxtaposés (*articulation par contiguïté*) peuvent se porter soit dans plusieurs sens, soit dans un seul ; cela dépend de la forme des cavités circulaires qui reçoivent les têtes d'os, et des ligaments qui entourent et brident l'articulation.

On nomme *arthrodie* une articulation qui permet les mouvements dans tous les sens comme celle du bras ; et *ginglyme* une articulation en charnière où le mouvement ne peut se faire que dans un sens comme celle du coude et de la jambe.

133. **Squelette.** *Tête.* — Le squelette des animaux vertébrés se compose d'un très-grand nombre d'os ; il peut se diviser en trois parties fondamentales : la tête, le tronc et les membres.

La *tête* se compose du crâne et de la face. Le *crâne* (*fig.* 36) s'articule sur la colonne vertébrale et peut en être considéré comme la terminaison, huit os entrent dans la constitution de cette sorte de boîte. En haut et en avant le *frontal* ou *coronal* *f* (*fig.* 36) ;

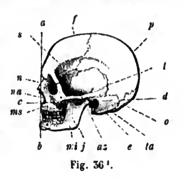


Fig. 36 [1].

[1] *f* os frontal ou coronal. — *p* pariétal. — *t* temporal. — *o* occipital. — *s* sphéroïde. — *n* os nasal. — *ms* maxillaire supérieur. — *j* os jugal. — *mi* maxillaire inférieur. — *na* ouverture antérieure des fosses nasales. — *ta* trou auditif. — *az* arcade zygomatique, formée par une portion des os jugal et temporal. — *a*, *b*, *c*, *d* lignes indiquant l'angle facial.

sur les côtés et en dessus, les deux ***pariétaux p;*** à la partie inférieure et postérieure l'***occipital o;*** sur les côtés et au-dessous des pariétaux, les deux ***temporaux t***. Enfin, la base du crâne est formée en avant par l'***ethmoïde*** et en arrière par le ***sphénoïde***. L'occipital, les pariétaux et le frontal s'articulent entre eux par engrenage, c'est-à-dire à l'aide d'une série de saillies et d'enfoncements, qui s'emboîtent exactement. Les temporaux s'articulent, au contraire, avec le reste du crâne par juxtaposition; leur bord est taillé en biseau et s'appuie simplement sur les autres os. C'est dans l'épaisseur d'une portion du temporal que se trouve logé l'organe de l'ouïe; cette partie, d'une dureté extrême, porte le nom de ***rocher;*** sur la face externe du temporal se remarque une apophyse très-saillante appelée apophyse ***zygomatique az***, qui concourt à former la pommette et donne attache aux muscles releveurs de la mâchoire inférieure. Cette dernière s'articule dans une cavité nommée cavité ***glénoïde***, creusée dans le même os.

La ***face*** est formée par quatorze os différents qui circonscrivent des cavités destinées à loger les organes de la vue, de l'odorat et du goût. Ces os, excepté celui de la mâchoire inférieure, sont complétement immobiles.

Ce dernier, appelé ***maxillaire inférieur (mi)***, présente une ressemblance grossière avec un fer à cheval; on y distingue deux branches réunies sur la ligne médiane par une suture plus ou moins visible. La mâchoire inférieure est mue par des muscles puissants qui s'insèrent d'une part à l'angle inférieur de cet os, d'autre part sur les côtés du crâne.

Le ***tronc*** se compose d'une partie principale, la colonne vertébrale, et de parties secondaires, qui sont le sternum, les côtes et le bassin.

134 ***Colonne vertébrale***. — La colonne vertébrale (*fig.* 38) s'étend de la tête à l'extrémité postérieure du corps; elle est formée par un grand nombre de petits os appelés vertèbres.

Chez l'homme, chaque vertèbre (*fig.* 37) se compose d'un corps ***a*** placé en avant et d'une partie annulaire qui donne naissance à sept apophyses. L'une d'elles, placée en arrière sur la ligne médiane, se prolonge en une pointe destinée à donner attache à des muscles; elle porte le nom d'***apophyse épineuse b***.



Fig. 37. Vertèbres.

Deux apophyses sont placées en dehors sur les côtés et sont appelées ***apophyses transverses c***. Enfin, les ***apophyses articulaires*** sont au nombre de quatre, deux supérieures et deux inférieures, et elles servent à unir les vertèbres entre elles. — La partie annulaire de la vertèbre est destinée à contenir et protéger la moelle épinière; sur les parties latérales sont des échancrures qui, en se réunissant deux à deux, forment des ***trous de conjugaison*** destinés au passage des nerfs.

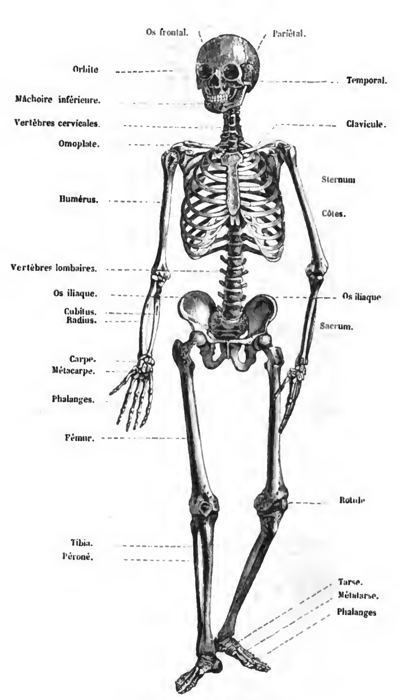


Fig. 58. — Squelette de l'Homme.

Les vertèbres de l'homme sont au nombre de trente-trois, à savoir : 7 cervicales, 12 dorsales, 5 lombaires, 5 sacrées, 4 coccygiennes.

La première vertèbre cervicale porte le nom d'*atlas*, elle ressemble à un anneau ; le corps et les apophyses épineuse et transverses y sont rudimentaires; elle s'articule avec les condyles de l'occipital. La seconde vertèbre ou *axis* présente en avant et en haut une saillie volumineuse ou *apophyse odontoïde* sur laquelle roule l'atlas.

Chacune des douze vertèbres dorsales porte deux côtes.

Les vertèbres lombaires sont grosses et trapues.

Les vertèbres sacrées sont soudées en un seul os connu sous le nom de *sacrum*. Les vertèbres coccygiennes sont très-petites et légèrement mobiles.

135. **Côtes.** — Les côtes (*fig.* 38), au nombre de 12 paires, sont des arcs osseux qui entourent la poitrine et forment la cage thoracique; elles peuvent exécuter des mouvements et servent au mécanisme de la respiration. (Voy. parag. 60).

La partie dorsale de ces os est complétement osseuse; au contraire, la partie antérieure est cartilagineuse; les sept premières côtes ou *côtes vraies* vont se réunir en avant à un os médian, connu sous le nom de *sternum;* les cinq suivantes ou *fausses côtes* ne s'étendent pas jusqu'à cet os. Chez quelques animaux, la grenouille par exemple (*fig.* 39), les côtes manquent, chez les serpents, au contraire, elles sont en nombre très-considérable, et il n'y a pas de sternum.

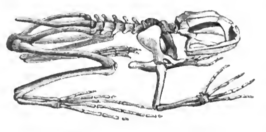


Fig. 39. — Squelette de Grenouille.

Omoplate.
Coracoïdien.
Fourchette.
Sternum.
Breschet.

Fig. 40.

136. **Sternum.** — La forme du sternum (*fig.* 38) varie considérablement suivant les groupes d'animaux où on l'observe ; lorsqu'il doit donner attache à des muscles puissants, son étendue augmente;

ainsi, chez les oiseaux (*fig.* 40), il s'étend au-devant du thorax et d'une partie de l'abdomen et présente sur la ligne médiane une crête saillante, connue sous le nom de ***breschet***. Chez les oiseaux grands voiliers, ces parties sont beaucoup plus développées que chez ceux qui ne se servent que peu ou point de leurs aîles; chez l'autruche, qui est destinée à la course, le breschet manque complétement.

Parmi les mammifères, les chauves-souris sont pourvues d'un sternum très-large.

La colonne vertébrale en arrière, le sternum en avant, les côtes latéralement, forment une sorte de cage destinée à soutenir les membres antérieurs.

137. **Membres.** — Chez les animaux supérieurs, ces appendices sont au nombre de quatre, deux supérieurs ou thoraciques et deux inférieurs ou abdominaux; ils se composent d'une partie basilaire qui sert de point d'appui et d'un levier articulé.

138. *Épaule.* — La partie basilaire du membre supérieur nommée épaule se compose de deux os, l'omoplate et la clavicule. L'***omoplate*** est un os plat, très-large et triangulaire; il est appliqué en arrière contre les côtes, sa face postérieure présente une crête saillante terminée par une apophyse nommée ***acromion***, avec laquelle s'articule la clavicule; au-dessous de cette apophyse se trouve une cavité articulaire destinée à recevoir la tête de l'os du bras.

La ***clavicule*** s'étend de l'omoplate à la partie supérieure du sternum et sert à maintenir les épaules écartées; chez les animaux dont les membres thoraciques peuvent exécuter des mouvements de dehors en dedans et de dedans en dehors, la clavicule existe, elle manque au contraire chez ceux qui ne peuvent exécuter que des mouvements d'avant en arrière ou de haut en bas. Chez les chevaux, les ruminants, les chiens, etc., elle manque; elle se trouve au contraire chez l'homme, les singes, les rongeurs grimpeurs, tels que l'écureuil.

Chez les oiseaux qui doivent ramener violemment le bras vers la poitrine, la clavicule est double (*fig.* 40); l'une porte le nom de ***fourchette;*** celle de droite, se soude sur la ligne médiane avec celle de gauche, et l'espèce de triangle ainsi formé s'appuie sur la partie antérieure du sternum, l'autre, connue sous le nom d'os ***coracoïdien***, est très-développée, elle s'articule solidement avec le sternum.

Le levier articulé qui s'appuie sur l'épaule se compose du bras, de l'avant-bras et de la main.

139. *Bras.* — Le bras est formé d'un seul os nommé ***humérus***, il se termine supérieurement par une tête sphérique qui s'articule avec l'omoplate, sur laquelle il peut rouler dans tous les sens. Il est long et cylindrique et présente de nombreuses aspérités destinées à donner attache à divers muscles; les principaux sont, le ***grand pectoral*** qui porte le bras

en dedans et en bas; le *deltoïde*, qui le relève, et le *grand dorsal*, qui le porte en bas et en arrière. L'extrémité inférieure de l'humérus est aplatie et présente une série de poulies, avec lesquelles les os de l'avant-bras, s'articulent en *ginglyme angulaire*. C'est-à-dire qu'ils ne peuvent exécuter de mouvements que dans un sens, comme une sorte de charnière.

140. *Avant-bras*. — L'avant-bras est formé de deux os, le *cubitus* et le *radius*; ce dernier peut, chez l'homme, tourner sur le cubitus et porter la paume de la main en haut ou en *supination* et en bas ou en *pronation*. Le radius est très-élargi à son extrémité inférieure, où il s'articule avec les os du poignet; au contraire, il est mince à son extrémité supérieure.

Le cubitus forme presque exclusivement l'articulation du coude et se termine en arrière par une apophyse saillante nommée *olécrâne*, sur laquelle s'insèrent les muscles extenseurs de l'avant-bras, et qui limite l'extension de ce levier à une ligne droite, car, elle vient alors s'appuyer contre l'humérus. Chez certains animaux, le cubitus n'est pour ainsi dire représenté que par cette seule partie; cette particularité se trouve chez les chevaux et les ruminants. Chez les oiseaux, le cubitus est très-développé, et sert à l'insertion des grandes plumes de l'aile.

141. *Main*. — La main se compose de trois parties : le poignet ou carpe, le métacarpe et les doigts.

Le *carpe* joint l'avant-bras à la main; il est formé de huit petits os sur deux rangées de quatre chacune.

Le *métacarpe* constitue le corps de la main; il est formé par une rangée de petits os longs; leur nombre correspond ordinairement à celui des doigts : chez l'homme on en compte cinq. Chez le cheval (*fig.* 41), au contraire, on n'en voit qu'un seul, connu sous le nom de *canon*, et résultant de la soudure des métacarpiens médians; de chaque côté du canon on voit un petit stylet osseux représentant les métacarpiens latéraux.

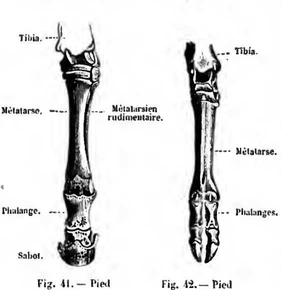


Fig. 41. — Pied de Cheval.

Fig. 42. — Pied de Ruminant.

Chez les ruminants (*fig.* 42), il existe également un canon, mais il présente à sa partie inférieure une poulie double et se termine par deux doigts au lieu d'un comme chez le cheval.

Les doigts sont constitués par de petits os placés à la suite les uns des autres et portant le nom de ***phalanges***. Le pouce n'en a que deux; les autres doigts en ont chacun trois. La première prend le nom de ***phalange***, la deuxième celui de ***phalangine***, la troisième celui de ***phalangette*** et porte l'ongle.

Les membres inférieurs ou abdominaux sont construits sur le même plan que les membres thoraciques. Leur portion basilaire, qui représente l'épaule, porte le nom de ***hanche***.

142. *Hanche.* — Cette partie est formée par un grand os plat, appelé os ***iliaque***; en avant ces deux os se soudent entre eux et en arrière ils s'appuient sur le sacrum de façon à former une sorte de ceinture osseuse, qui porte le nom de ***bassin;*** sur les côtés se voit une cavité semi-sphérique appelée ***cavité cotyloïde*** et qui est destinée à loger la tête de l'os de la cuisse.

Le levier articulé qui s'appuie sur le bassin se compose de trois parties, la cuisse, la jambe et le pied.

143. *Cuisse.* — La ***cuisse***, qui correspond au bras, ne se compose que d'un seul os, le ***fémur***, analogue de l'humérus. Il offre à son extrémité supérieure une tête sphérique destinée à son articulation et portée sur un col oblique, et des tubérosités, désignées sous le nom de ***trochanters*** qui servent à l'insertion des muscles. Son extrémité inférieure est renflée et présente deux condyles arrondis qui s'articulent avec les os de la jambe pour constituer le genou.

144. *Jambe.* — La jambe, de même que l'avant-bras, est constituée par deux os, le ***tibia*** et le ***péroné;*** de plus, au-devant du genou se voit un petit os, la ***rotule***, que l'on regarde comme l'analogue de l'apophyse olécrâne et qui sert à empêcher la jambe de se ployer trop en avant.

Le tibia est beaucoup plus fort que le péroné, il sert presque exclusivement à l'articulation du pied; aussi son extrémité est-elle disposée de façon à former un ginglyme très-serré.

Le péroné est un os très-long et très-grêle, il est placé en dehors du tibia; il est immobile et ne peut tourner sur cet os, comme le radius roulait sur le cubitus. Son extrémité inférieure est renflée et forme la ***malléole*** interne, ou ***cheville*** du pied: la malléole externe est formée par l'extrémité inférieure du tibia.

Chez quelques animaux, les chevaux et les ruminants par exemple, le péroné manque ou est rudimentaire; chez les oiseaux il se présente comme une simple baguette osseuse.

145. *Pied.* — Le ***pied*** se compose comme la main de trois parties: le tarse, le métatarse et les doigts. Le tarse est constitué par sept os.

L'*astragale* sert seul à l'articulation de la jambe, et repose sur le *calcaneum* ou os du talon ; les autres os sont plus petits et moins importants.

Le nombre des os du métatarse correspond en général à celui des doigts; chez l'homme on en compte cinq, chez les ruminants et le cheval, ils sont soudés en un seul os, ou *canon postérieur.*

Les doigts du pied portent le nom d'orteils et se composent de phalanges en nombre égal à ceux de la main. Chez les oiseaux, les os du métatarse et du tarse sont soudés en un seul os terminé inférieurement par une triple poulie sur laquelle s'articulent les doigts.

MODIFICATIONS DE L'APPAREIL LOCOMOTEUR POUR SERVIR A LA MARCHE, AU VOL, A LA NATATION ET A LA REPTATION DANS LES DIVERS ANIMAUX.

146. — Le genre de vie d'un animal entraîne nécessairement de profondes modifications dans la conformation de ses membres. Tandis que certains vertébrés sont destinés à se mouvoir sur un sol résistant, d'autres doivent se soutenir dans les airs, d'autres vivre dans l'eau ; enfin quelques-uns rampent à la surface de la terre. — Tous ces êtres ont un squelette formé à peu près des mêmes éléments; mais ces différentes parties peuvent se développer beaucoup ou s'atrophier.

147. **Marche**. — Chez les animaux qui vivent à la surface de la terre et qui ne rampent pas, le corps est soutenu par des membres. Chez l'homme, les membres postérieurs seuls servent à cet usage ; chez les mammifères, les membres antérieurs agissent aussi; dans ce cas, la station est beaucoup moins fatigante, car la base de sustentation est très-large, et l'animal n'a besoin que de peu d'efforts pour se maintenir en équilibre ; aussi voit-on des quadrupèdes, tels que des chevaux, passer facilement un temps très-long sans se coucher. Dans ce cas, il n'y a aucun avantage à ce que la base de chaque membre en particulier soit large ; elle serait alourdie, et son déplacement se ferait plus difficilement. Il est, au contraire, important que chaque levier soit grêle, et par conséquent léger. Chez les animaux coureurs, tels que les cerfs, les chevaux, etc. Chaque membre affecte la forme d'une tige rigide dont l'extrémité n'est que peu ou point renflée, et le nombre des doigts diminue de façon qu'il ne reste plus chez les chevaux qu'un seul os au métacarpe et au métatarse. — Mais, lorsque la station est bipède, il faut, pour que le corps conserve son équilibre, que la base de sustentation présente une certaine largeur et une certaine longueur, comme on le voit chez l'homme et les oiseaux.

148. **Vol**. — Quand un animal est destiné à se soutenir dans les airs, c'est à l'aide de ses membres antérieurs plus ou moins modifiés que ce mode de locomotion s'effectue. Quelques mammifères peuvent voler ; les chauves-souris sont dans ce cas. Ce résultat est obtenu

d'une manière assez simple (*fig.* 43) et sans que la nature ait recours à des instruments de création spéciale. Les os du bras et de l'avant-bras ne présentent aucune particularité; mais les doigts s'allongent beaucoup,



Fig. 43. — Squelette de Chauve-souris[1].

s'écartent et servent à soutenir, comme le feraient les baleines d'un parapluie, un repli de la peau des flancs qui se prolonge en arrière jusqu'au talon.

Quelques écureuils et les galéopithèques peuvent, non pas voler, mais se soutenir un instant dans les airs et retarder leur chute. Ce résultat est obtenu à l'aide d'un prolongement de la peau des flancs, qui s'étend en manière de parachute d'un membre à l'autre.

Chez les oiseaux, nous trouvons des parties spéciales : ce sont les plumes. Le squelette est aussi plus profondément modifié. — Les membres antérieurs forment des espèces de rames appelées ailes. L'humérus, le cubitus et le radius sont conformés, à peu de chose près, sur le même plan que chez des mammifères. Le carpe est rudimentaire; il ne se compose que de deux os. Le métacarpe est formé par un seul os qui présente deux branches soudées entre elles par leurs extrémités. Au côté radial de ce métacarpe s'insère un pouce rudimentaire, et à son extrémité se voient un doigt médian, composé de deux phalanges et un petit stylet, trace du doigt externe. Les grandes plumes de l'aile s'insèrent directement sur le cubitus, sur le métacarpe et sur les phalanges.

[1] *cl* clavicule. — *h* humérus. — *cu* cubitus. — *r* radius. — *ca* carpe. — *po* pouce. — *mc* métacarpe. — *ph* phalanges. — *o* omoplate. — *f* fémur. — *ti* tibia.

Quand un oiseau veut s'élever dans les airs, il élève l'humérus, l'avant-bras étant ployé, puis il étend ce dernier, et abaisse vigoureusement le bras. L'air, refoulé par ce mouvement, oppose une certaine résistance et fournit un point d'appui à l'aile. L'oiseau est ainsi soulevé. En répétant rapidement ce mouvement, il peut se mouvoir avec une grande vitesse dans le fluide ambiant. — La puissance musculaire que l'oiseau doit développer dans le mécanisme du vol entraîne différentes modifications dans la structure, non-seulement de ses membres antérieurs, mais encore de sa charpente osseuse. Comme nous l'avons déjà dit, le sternum s'élargit et se garnit d'une carène saillante pour présenter une large surface d'insertion aux muscles de l'aile. La clavicule est double, afin de former de puissants arcs-boutants à l'épaule (Voy. par. 136, *fig.* 40); enfin des sacs aériens se développent entre les viscères et les muscles, afin de diminuer le poids spécifique de l'oiseau.

De même que les oiseaux, certains insectes peuvent se soulever dans les airs. Leurs ailes se présentent sous la forme d'appendices lamelleux, composés d'une double membrane, soutenus à l'intérieur par des nervures cornées.

148. **Natation.** — Certains animaux sont destinés à vivre dans l'eau et à pouvoir s'y mouvoir en nageant. Quand les membres doivent servir à la fois à la marche et à la natation, ils sont en général élargis à leur extrémité, de façon à pouvoir agir comme une rame. Ainsi, chez les oiseaux nageurs, tels que les oies, les canards, les pieds sont palmés, c'est-à-dire que les doigts sont réunis par une membrane qui présente une large surface pouvant frapper l'eau. Chez les mammifères qui nagent facilement, tels que la loutre, il en est de même; mais quand l'animal est destiné à vivre uniquement dans l'eau, les modifications que le squelette éprouve sont plus profondes. Le bras et l'avant-bras se raccourcissent, la main présente une largeur considérable, et les doigts, réunis sous une enveloppe commune, sont disposés comme une palette. Les membres du phoque sont construits sur ce plan. Chez les poissons, les membres sont beaucoup plus profondément modifiés; ils sont représentés par une série de petits os, portés sur une sorte de ceinture osseuse et soutenant une membrane qui constitue la nageoire. Les nageoires formées aux dépens des membres ne servent que peu à la locomotion des poissons; leur organe de progression le plus puissant est la queue, qui s'élargit en palette, et c'est en frappant l'eau par des flexions rapides de cette queue et du tronc, que le saumon peut parcourir trois ou quatre myriamètres en une heure.

149. **Reptation.** — Quelques animaux vertébrés posent sur le sol par toute la longueur de leur corps, et ne se déplacent que par des ondulations de leur tronc : ils *rampent*. Les serpents sont dans ce cas ; chez eux on ne trouve plus aucune trace des membres; leur squelette

ne se compose que d'une tête, d'une colonne vertébrale et de côtes. Ces côtes sont libres en dessous; elles peuvent par leurs mouvements aider au déplacement du corps de l'animal; mais quand la progression doit être rapide, elle se fait à l'aide d'une série d'ondulations, l'animal prenant un point d'appui sur l'une des extrémités de son corps pour éloigner l'autre, s'appuyant à son tour sur celle-ci pour rapprocher la première, et ainsi de suite.

Certains animaux offrent à chaque extrémité de leur corps une ventouse à l'aide de laquelle ils peuvent se fixer; c'est de cette manière et en contractant, puis allongeant alternativement leur corps, qu'ils progressent. Les sangsues sont dans ce cas.

CLASSIFICATION GÉNÉRALE DU RÈGNE ANIMAL

Espèce, variété, race, genre. — Division du règne animal en embranchements et en classes.

150. — Dans le principe on a donné à chaque espèce d'animal un nom particulier; mais le nombre de ces espèces est bientôt devenu tellement considérable qu'il était impossible à la mémoire de fixer tous ces noms; on a alors réuni les espèces entre elles suivant leur plus ou moins grande ressemblance et on en a formé des groupes dont on a étudié les caractères. En un mot, on a été forcé d'arriver à une classification.

151. **Espèce.** — On a donné le nom d'*espèce* à l'ensemble des animaux semblables, pouvant être considérés comme descendants d'une paire primitive et se reproduisant avec les mêmes caractères, comme les chevaux, les moutons, les bœufs. L'espèce ne varie que dans des limites très-restreintes. Les animaux conservés dans les pyramides d'Égypte, pendant près de quatre mille ans, ne diffèrent en rien de ceux qui vivent encore aujourd'hui dans le même pays.

152. **Variétés.** — Tous les individus d'une même espèce ne sont cependant pas identiquement semblables. Pendant le cours même de leur vie, ils changent d'aspect; et ils diffèrent entre eux par une multitude de particularités qui ne touchent pas aux caractères de l'espèce, mais qui constituent des *variétés*.

153. **Races.** — Parmi les caractères qui forment les variétés, quelques-uns sont héréditaires, et les individus qui héréditairement reproduisent ces caractères constituent les *races*.

Mais les races sont presque toujours artificielles. C'est en général sous l'influence de l'homme que certains animaux deviennent la souche d'une race. Pour arriver à ce résultat on recherche parmi de nombreux animaux domestiques ceux qui accidentellement présentent les particularités que l'on désire perpétuer; on les réunit ensemble, et le plus souvent les petits qu'ils produisent jouissent des mêmes caractères et des mêmes fa-

cultés qu'eux. Les races que l'homme a créées sont innombrables, et répondent à ses besoins. C'est ainsi qu'il a formé des races de chevaux de course, légers et rapides, et de chevaux de trait, lourds et robustes. Quand les besoins de l'homme n'existent plus, la race ne tarde pas à disparaître; c'est ce qui a eu lieu dans ce moment pour la race des chiens lévriers, dont on ne peut plus tirer parti pour la chasse; donc, sous l'influence de l'homme, une espèce peut s'écarter de son type primitif; mais quand cette influence cesse l'espèce se reconstitue telle qu'elle était. Autant les races sont variables, autant les espèces le sont peu.

A côté de ces *races artificielles*, résultat des efforts des hommes, se trouvent les *races naturelles*, qu'il est difficile de distinguer des espèces proprement dites. Mais l'espèce a pour caractère de ne pas pouvoir se croiser d'une manière permanente; au contraire, les races se croisent facilement. L'espèce résulte d'une seule paire primitive, et les animaux qui en résultent se succèdent à l'infini; ce ne sont que des émanations directes de leurs premiers parents; deux espèces différentes à l'état sauvage ne se croisent jamais; en domesticité, l'homme est parvenu à faire produire l'âne et le cheval, le serin et le chardonneret, le lièvre et le lapin, le bœuf et le bison; mais la reproduction s'arrêtait là, et les produits ainsi obtenus étaient inféconds. De ces faits il faut conclure que l'espèce est stable et tient à l'essence des animaux. Aussi doit-elle être prise pour point de départ dans l'étude du règne animal.

Chaque espèce, comme nous l'avons dit, a reçu primitivement un nom. Ainsi on a dit l'espèce chat, l'espèce chien; mais un même groupe en est arrivé à renfermer trop de divisions spécifiques; il a fallu réunir les espèces voisines entre elles et en former des genres. *Le genre est la réunion des espèces qui diffèrent peu les unes des autres.*

Ainsi, du loup, du renard et du chien, on a formé le genre *canis*, et on désigne le renard sous le nom de *canis vulpes*, le loup sous celui de *canis lupus;* chaque espèce portant ainsi deux noms que l'on peut assimiler à des noms de baptême et à des noms de famille.

On a réuni les genres les plus voisins pour en former des *tribus;* des tribus on a fait les *familles;* la réunion des familles a constitué les *ordres;* ceux-ci ont formé les *classes*, et avec les classes on a fait les *embranchements* qui, par leur réunion, constituent le *règne animal.*

On n'est pas arrivé de prime abord à cet ensemble de classification. Les premiers naturalistes ont bien reconnu de suite les principaux groupes naturels tels que ceux des mammifères, des oiseaux, des reptiles et des poissons; mais ils y ont établi des coupes arbitraires, et ils ont pris pour base soit les *systèmes*, soit les *méthodes*.

154. **Divers modes de classification.** — On appelle système ou classification systématique toute classification dans laquelle on s'attache seulement à un ou plusieurs caractères pris arbitrairement, et d'après

lesquels on range les espèces. Ce mode de groupement est commode pour arriver immédiatement au nom de l'espèce que l'on veut déterminer; mais il présente de grands inconvénients en ce qu'il réunit des animaux souvent très-différents et en éloigne qui ont entre eux beaucoup d'analogie. Si, par exemple, on range ensemble les animaux à deux pieds, on placera l'homme à côté des oiseaux, tandis qu'on l'éloignera de certains singes.

Au contraire, dans les méthodes naturelles on classe les animaux d'après l'ensemble de leurs caractères les plus importants en ne leur donnant pas à tous la même valeur. Ainsi, un caractère que l'on regarde comme fondamental et important vaut plusieurs caractères accessoires.

La première classification méthodique est due à Bernard de Jussieu, qui commença le premier cette grande réforme. Son neveu, Antoine-Laurent, continua et compléta l'œuvre commencée, et, en 1728, publia le premier ouvrage de ce genre, le *Genera Plantarum*. Il étudia d'abord l'ensemble des caractères, jugeant de leur importance par leur fixité et leur persistance. Cuvier suivit à peu près la même voie pour le règne animal; et, bien que le nombre des espèces et des genres se soit considérablement accru depuis cette époque, les méthodes de de Jussieu et de Cuvier sont encore suivies aujourd'hui.

GRANDES DIVISIONS DU RÈGNE ANIMAL

155. Cuvier divisa le règne animal en quatre embranchements: 1° les ***vertébrés**; 2° les **annelés**; 3° les **mollusques**; 4° les **zoophytes**.*

Ayant constaté que ce sont les fonctions de relation qui distinguent les animaux des végétaux, Cuvier leur a donné une grande valeur, et a d'abord interrogé le système nerveux pour classer les animaux. Entre la disposition du système nerveux et la forme du corps il existe de grands rapports. Chez les rayonnés, le système nerveux est pour ainsi dire rayonné (exemple l'astérie ou étoile de mer). — Chez les mollusques, il est symétrique, et constitue, autour du tube digestif, une sorte d'anneau appelé le collier œsophagien. — Chez les annelés, il constitue également un collier œsophagien, mais il est très-allongé et consiste en une longue série simple ou double de ganglions. — Chez les vertébrés le système nerveux occupe le côté dorsal du corps et se compose d'un axe cérébro-spinal qui envoie des filets dans tous les membres.

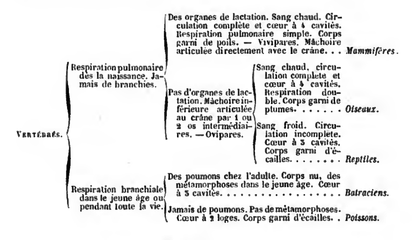
Système nerveux.	Cerveau et moelle épinière.			*Vertébrés.*
	Ni cerveau ni moelle épinière.	Chaine ganglionnaire.		*Annelés.*
		Pas de chaine.	Système nerveux diffus.	*Mollusques.*
			— — rayonnant.	*Rayonnés*

EMBRANCHEMENT DES VERTÉBRÉS

Organisation générale des mammifères, des reptiles, des oiseaux, des batraciens et des poissons.

156. Chez les vertébrés le squelette est toujours intérieur et recouvert d'une masse musculaire et de la peau. Les centres nerveux, situés tous du côté dorsal du tube digestif, sont enveloppés et protégés par le squelette. La peau enveloppe et protége toutes ces parties. Le corps de tout vertébré peut être partagé en deux moitiés symétriques par un plan médian longitudinal.

Pour diviser l'embranchement des vertébrés en classes on s'est basé sur les fonctions de la respiration et de la circulation ; c'est en suivant cette marche que l'on est arrivé à y établir les coupes suivantes.



MAMMIFÈRES

LEUR DIVISION EN ORDRES.

157. — *Les mammifères sont des vertébrés à circulation complète, à cœur présentant quatre cavités ; à sang chaud ; à respiration pulmonaire simple ; pourvus d'organes de lactation ; à lobes du cervelet réunis par une protubérance annulaire ; à mâchoire inférieure directement articulée avec le crâne, à corps ordinairement garni de poils. — Enfin ils sont vivipares.*

Les mammifères sont pour la plupart conformés pour se mouvoir sur un plan résistant. L'homme seul marche sur deux pieds, la cuisse étendue

sur la jambe. Lorsqu'un singe se tient debout, position qui d'ailleurs n'est pour lui qu'accidentelle, la cuisse est fléchie sur la jambe.

Quelques mammifères peuvent se soutenir dans les airs, mais leurs ailes n'ont aucune analogie avec celles des oiseaux ; les chauves-souris, par exemple, présentent une membrane fine étendue entre les doigts, qui sont extraordinairement développés. Elles peuvent, en frappant l'air, voler avec une assez grande rapidité. — Quelques mammifères vivent dans l'eau, les baleines sont dans ce cas ; les membres se modifient alors et se transforment en nageoires véritables ; quelquefois ils disparaissent, comme cela se voit pour les membres postérieurs de la baleine.

Presque tous les mammifères sont couverts de poils ; l'homme n'en présente pas sur tout son corps. Les cétacés, qui vivent dans l'eau, en sont dépourvus. Chez quelques mammifères la peau est couverte de productions cornées de même nature que les poils, mais dures et ressemblant à des épines : ce sont des ***piquants***, comme chez les hérissons, et les porcépics. Quelques-uns ont le corps enveloppé de véritables écailles formées par des poils soudés ensemble : par exemple, les tatous et les pangolins.

Tous les mammifères sont vivipares ; leurs petits naissent à l'état presque parfait. Tantôt ils peuvent marcher et courir aussitôt après leur naissance ; tantôt leurs yeux sont fermés, et ils peuvent à peine remuer. Tous se nourrissent de lait, substance alimentaire particulière sécrétée par des glandes spéciales, les mamelles.

Les mammifères sont divisés en ***mammifères ordinaires*** ou ***monodelphes***, et en ***mammifères marsupiaux*** ou ***didelphes***.

Chez les premiers, la ceinture osseuse antérieure n'est jointe à la ceinture osseuse postérieure que par la colonne vertébrale, tandis que chez les seconds la ceinture osseuse postérieure se continue par les ***os marsupiaux*** (*fig.* 44), qui sont disposés au-devant de l'abdomen.

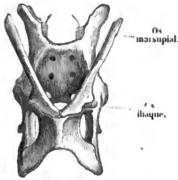
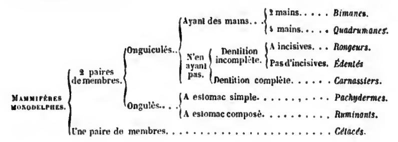


Fig. 44.

MAMMIFÈRES MONODELPHES.

158. Parmi les mammifères monodelphes, les uns ont quatre membres, les autres n'en ont que deux ; en effet, chez les *cétacés* ou mammifères aquatiques, les membres postérieurs disparaissent. Parmi les monodelphes à quatre membres, les uns sont ***onguiculés***, c'est-à-dire ont les doigts terminés par des ongles ou des griffes, les autres ont les doigts

garnis de sabots, ces derniers sont *ongulés*. On peut donc diviser les mammifères comme il suit :



De cette manière, lorsqu'on sait à quel ordre appartient un animal, on connaît déjà beaucoup des particularités de son organisation. On sait, par exemple, qu'un carnassier a une respiration aérienne, une circulation double, pas d'os marsupiaux ; qu'il est couvert de poils, pourvu de deux paires de membres, que ces membres sont onguiculés, et que sa dentition est complète.

159. **Bimanes.** — L'homme se distingue de tous les autres animaux par son intelligence, ce qui l'a fait placer par beaucoup de zoologistes dans un règne à part, le *règne humain ;* mais, si on le considère abstraction faite de cette intelligence, il doit se ranger, parmi les mammifères, à côté des quadrumanes. — Quelles que soient les variétés que peut présenter l'espèce humaine, elle paraît être unique et sortie d'une même souche ; en effet, deux espèces différentes ne produisent que très-difficilement entre elles, et le produit est infécond. L'homme, au contraire, quelle que soit sa race, se croise facilement, et ses produits sont féconds. — Les races naturelles auxquelles l'espèce humaine a donné naissance sont assez nombreuses ; on y distingue quatre types principaux :

1° Le type *caucasique* ou race blanche ;
2° Le type *mongolique* ou race jaune ;
3° Le type *éthiopique* ou race noire ;
4° Le type *américain* ou race rouge.

160. **Quadrumanes.** — Le caractère des quadrumanes est d'avoir quatre mains. On appelle main l'extrémité d'un membre où l'un des doigts est opposable aux autres et peut saisir un objet. L'homme n'a que deux mains très-parfaites ; le singe en a quatre, mais beaucoup moins parfaites. Ce groupe doit être regardé comme naturel, parce que les animaux qui le composent ont tous les mêmes caractères principaux, et que leurs modifications sont insignifiantes. La dentition du singe est complète, c'est-à-dire que, comme chez l'homme, il a des incisives, des canines et des molaires. Les canines sont en général très-dévelop-

pées. Chez quelques singes, tels que le gorille, elles sont aussi fortes que chez le tigre.

L'orang-outang, l'un des singes qui se rapprochent le plus de l'homme, présente une paire de côtes de plus. Jeune, il est assez intelligent, mais en vieillissant il s'abrutit. Le chimpanzé (*fig.* 45) est susceptible d'une sorte d'éducation, mais, de même que l'orang-outang, il perd son intelligence en vieillissant. Les mandrilles et les cynocéphales sont farouches et sauvages; leurs ongles s'allongent et ressemblent à des griffes; leurs canines sont fortes et aiguës.



Fig. 45. — Chimpanzé.

Chez les singes de l'ancien continent, il n'y a pas de queue, ou cet organe est roide et non préhensile. Chez les singes du nouveau continent, au contraire, la queue peut facilement s'enrouler et devient un nouvel organe, sinon de préhension, du moins de suspension.

161. **Carnassiers.** — L'ordre des carnassiers réunit des types qui, au premier abord, pourraient paraître essentiellement différents; il suffit de citer les chats, les taupes, les chauves-souris et les phoques. Aussi a-t-on subdivisé cet ordre en différents sous-ordres : les carnassiers proprement dits, les amphibies, les insectivores et les chéiroptères.

Les *carnassiers proprement dits* ont pour type le genre chat. Leurs mâchoires sont courtes et mises en mouvement par des muscles puissants; l'articulation des condyles est serrée de façon à ne pouvoir exécuter aucun mouvement de latéralité. Leurs dents sont tranchantes et aiguës (Voy. *fig.* 2); on compte en avant, à chaque mâchoire, six incisives, puis deux canines, et un nombre variable de molaires, dont l'une, beaucoup plus forte que les autres, est destinée à couper les chairs, et porte le nom de *carnassière*. Quelques-uns des animaux qui composent ce groupe sont doués d'une grande agilité; chez eux les os du métatarse s'allongent, et l'animal devient *digitigrade*, c'est-à-dire qu'il marche sur le bout des doigts; *ex. :* la civette (*fig.* 46), le chat, etc.



Fig. 46. — Civette.

D'autres sont beaucoup plus lourds; au lieu de ne se repaître que de proies vivantes, ils se nourrissent aussi de fruits; leur marche a besoin d'être moins rapide; chez eux les os du métatarse sont courts, et l'animal devient ***plantigrade***, c'est-à-dire qu'il repose sur la plante des pieds : c'est ce que l'on observe chez l'ours (*fig.* 47). Une disposition remarquable permet aux griffes de certains carnassiers de ne pas s'user en frottant contre le sol pendant la marche : un tendon élastique, qui s'attache aux phalanges et à la griffe, tient cette dernière ordinairement élevée, et il faut un effort musculaire de l'animal pour l'abaisser, et par conséquent la faire saillir au dehors.



Fig. 47. — Ours.

Par leurs caractères anatomiques, les ***amphibiens*** se rapprochent beaucoup des carnassiers ordinaires; mais leurs membres sont disposés pour la natation, comme on le remarque chez les phoques et les morses.

Les ***chéiroptères*** (V. *fig.* 43), au contraire, sont, destinés à se soutenir dans les airs; leurs membres antérieurs se modifient, les doigts s'allongent beaucoup et soutiennent une membrane fine et délicate de façon à constituer un organe de vol. Exemple la chauve-souris.

Les ***insectivores*** se distinguent des autres animaux du même groupe par la disposition de leur système dentaire (*fig.* 48). Leur nom indique qu'ils se nourrissent d'insectes; or, les enveloppes cornées de ceux-ci ne peuvent être entamées que par des dents dures et coupantes; aussi leurs canines ne sont-elles que médiocrement développées. Les molaires, au contraire, sont hérissées de petites pointes coniques s'engrenant les unes dans les autres; on peut observer cette disposition chez les taupes, les musaraignes, les hérissons.



Fig. 48. — Dents d'Insectivore.

162. **Rongeurs**. — L'ordre des rongeurs constitue l'un des groupes

les plus naturels de la classe des mammifères; tous les animaux qui le composent présentent entre eux un air de famille, et tous offrent un caractère physique commun : c'est l'absence de canines (*fig.* 49); les incisives, au contraire, sont très-développées et croissent pendant toute la durée de la vie; elles conservent toujours leur tranchant, parce que la lame d'émail placée en avant présente une grande épaisseur et s'use moins vite que le reste de la dent. Quelques rongeurs, comme l'écureuil, sont destinés à grimper aux arbres; aussi sont-ils pourvus de clavicules qui maintiennent l'écartement des épaules; les rats et les autres rongeurs qui ne jouissent pas des mêmes facultés sont dépourvus de cet os.



Fig. 49. — Tête de Rongeur.

Les anciens ne connaissaient que la souris; le rat noir arriva d'Orient à l'époque des croisades. — Le rat brun ou surmulot ne se montra en France que vers le dix-huitième siècle; il chassa le rat noir, et aujourd'hui il existe presque seul.

Les lièvres, les lapins, les lérots (*fig.* 50), les castors, les porc-épics font partie de l'ordre des rongeurs.



Fig. 50. — Lérot.

163. **Édentés.** — L'ordre des édentés est caractérisé par l'absence d'incisives; l'appareil masticateur ne se compose que de molaires et de canines; quelquefois même les dents manquent complétement, comme chez le tamanoir ou fourmilier (*fig.* 51), qui ne se nourrit que de fourmis et qui les prend à l'aide de sa langue, très-allongée et gluante, sur laquelle s'attachent ces insec-



Fig. 51. — Tête de Tamanoir.

tes. Les tatous et les pangolins (*fig.* 52), dont le corps est couvert d'une espèce de bouclier formé aux dépens des poils agglutinés, font partie de cet ordre. Pendant la période géologique qui a précédé la nôtre, les représentants de ce groupe étaient plus nombreux qu'aujourd'hui et leur taille était considérable. Ainsi, le glyptodon, dont on trouve les restes en Amérique, atteignait environ la taille d'un rhinocéros ; son corps était couvert d'une carapace épaisse en forme d'écaille de tortue.

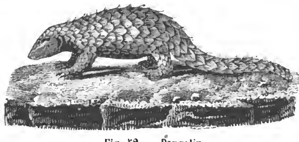


Fig. 52. — Pangolin.

164. **Pachydermes**. — L'ordre des pachydermes, qui fait aussi partie des mammifères ongulés, est beaucoup moins naturel que les deux ordres précédents; il peut se diviser en trois familles : les solipèdes, les pachydermes ordinaires et les proboscidiens.



Fig. 53.
Pied de cheval.

La famille des *solipèdes* est remarquable par la conformation des pieds, qui se terminent par un doigt unique, garni d'un seul sabot. Elle est constituée par les différentes espèces du genre cheval : l'âne, l'hémione, le zèbre, etc. L'âne se trouve à l'état sauvage dans les montagnes de la Perse. Quant au cheval, on ignore quelle est sa souche primitive.

Les *pachydermes ordinaires* ont les pieds terminés par des doigts dont le nombre varie de deux à quatre : le sanglier, le tapir, l'hippopotame (*fig.* 54.) et le rhinocéros appartiennent à ce groupe.



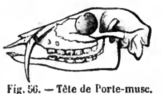
Fig. 54. — Hippopotame.

La famille des ***proboscidiens*** comprend le genre éléphant, et est caractérisée par la disposition du nez, prolongé en une longue trompe préhensile.

On trouve un grand nombre de pachydermes fossiles. Aux environs de Paris, dans les couches du gypse de Montmartre, on rencontre des paléothérium qui devaient ressembler aux tapirs; sur d'autres points, dans l'Orléanais, par exemple, on trouve des mastodontes qui, par leur forme, se rapprochaient beaucoup des éléphants. Dans les terrains de transport, on rencontre le mammouth, espèce d'éléphant dont le corps était couvert d'une laine épaisse.

165. **Ruminants.** — L'ordre des ruminants est très-naturel. Tous les animaux qui le composent présentent entre eux les analogies les plus étroites; aussi, pour y établir des coupes, on a dû se baser sur des caractères peu importants. Chez tous ces animaux il n'y a pas de clavicules, les os du tarse et du métatarse sont soudés et ne forment qu'un seul os, appelé canon (*fig.* 55); le canon s'articule avec deux doigts, pourvus chacun d'un sabot distinct. — L'estomac se compose, comme nous l'avons vu, de quatre cavités (Voy. paragr. 13 *fig.* 6 et 7). Les ruminants n'ont pas d'incisives à la mâchoire supérieure; les canines manquent presque toujours, si ce n'est chez quelques chevrotains (*fig.* 56) et chez le cerf muntjac. Les molaires sont au nombre de six de chaque côté; elles sont disposées de façon à écraser et broyer comme des meules; aussi la mâchoire peut-elle exécuter des mouvements de latéralité.


Fig. 55. Pied de ruminant.


Fig. 56. — Tête de Porte-musc.

Pour établir des coupes dans l'ordre des ruminants, on a d'abord eu égard à la conformation de l'estomac; on a séparé sous le nom de ***caméliens*** ceux qui étaient pourvus d'une cinquième poche stomacale, servant de réservoir à l'eau; les chameaux, les lamas, les vigognes sont dans ce cas; ces animaux ont, de plus, les globules du sang elliptiques. Puis on a pris en considération les caractères que présentaient les cornes, qui, tantôt sont pleines et tombent tous les ans, comme chez le cerf, tantôt sont creuses, comme chez le mouton, et dont l'intérieur est rempli par un prolongement de l'os frontal; ces dernières sont persistantes et ne tombent jamais. Enfin certains ruminants, tels que les chevrotains, sont dépourvus de cornes; l'animal qui fournit le musc, et que pour cette raison on nomme ***porte-musc***, est dans ce cas.

Les ruminants à cornes caduques, ou bois, ne constituent qu'un seul genre, celui des cerfs (*fig.* 57) ; leurs cornes, formées d'une substance osseuse, tombent chaque année.

Les cornes persistantes sont formées d'une gaîne cornée,



Fig. 57. — Cerf de France.



Fig. 58. — Tête d'Antilope.

analogue à une couche de poils agglutinés : les antilopes (*fig.* 58), les bœufs, les moutons, les chèvres présentent cette disposition.

166. **Cétacés.** — L'ordre des cétacés se compose d'animaux essentiellement marins. Les membres postérieurs manquent complétement, et les membres antérieurs sont modifiés de façon à constituer des nageoires. Chez ces animaux, la glotte se prolonge jusqu'aux arrière-narines, de manière à pouvoir constituer un tube non interrompu et à permettre à ces animaux de respirer pendant qu'ils avalent de l'eau.



Fig. 59. — Marsouin.

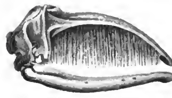


Fig. 59 *bis*. — Tête de Baleine.

Parmi les cétacés, les uns sont herbivores, comme le dugong et le lamantin, les autres carnivores, comme le cachalot, le marsouin (*fig.* 59), le dauphin et la baleine. Cette dernière présente des fanons en place des dents (*fig.* 59 *bis*).

MAMMIFÈRES DIDELPHES.

167. Les mammifères didelphiens se composent d'animaux singuliers, presque tous propres à la Nouvelle-Hollande. — Chez la plupart d'entre eux les petits naissent à l'état embryonnaire et incapables de supporter les influences extérieures; aussi la mère présente au-devant de l'abdomen une poche formée par un repli de la peau, où elle loge son petit (*fig.* 60), qui reste ainsi fixé sur la mamelle de sa mère; le lait coule dans sa bouche, et il se nourrit sans en avoir conscience. Quand les petits sont assez forts, ils sortent de cette poche, mais pendant un temps assez long ils courent s'y réfugier pour se garantir du froid ou du danger.



Fig. 60. — Sarigue.

Le cerveau des didelphiens se rapproche de celui des oiseaux par l'absence de circonvolutions et du corps calleux ou mésolobe; enfin la ceinture pelvienne présente en avant deux tiges osseuses qui remontent au-devant des muscles abdominaux, et qui portent le nom d'os marsupiaux (Voy. *fig.* 44).

Cette sous-classe se divise en deux ordres : celui des ***marsupiaux*** et celui des ***monotrèmes***.

Les marsupiaux ou mammifères à bourse, présentent ce fait intéressant, qu'ils comprennent des animaux dont le régime est complétement différent, et, de même que parmi les mammifères ordinaires nous avons trouvé des carnassiers, des insectivores, des rongeurs, de même nous les retrouvons parmi les marsupiaux, qui, construits sur un type différent,

semblent former avec les mammifères ordinaires une série parallèle : les sarigues, les kangouroos, etc., font partie de cet ordre.

Les monotrêmes ont beaucoup d'analogie avec les oiseaux. Ainsi, les organes de la reproduction et de la digestion se réunissent dans une poche commune appelée cloaque, leur museau est terminé par un bec corné, leurs doigts sont palmés. Jusqu'à présent cet ordre ne se compose que des ornithorynques et des échidnés.

CLASSE DES OISEAUX.

LEUR DIVISION EN ORDRES.

168. — La classe des oiseaux est une des plus homogènes du règne animal, et tous ses représentants se reconnaissent au premier coup d'œil; on peut les définir ainsi.

Les oiseaux sont des animaux vertébrés à circulation double et complète, à respiration aérienne et double, à sang chaud.

Ils sont ovipares.

Leurs membres antérieurs sont conformés pour le vol, leur peau est garnie de plumes.

Le squelette des oiseaux se compose des mêmes parties que celui des mammifères, mais ces parties se modifient de manière à s'adapter aux fonctions qu'elles doivent remplir.

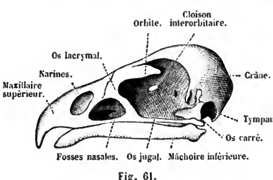


Fig. 61.

La tête (*fig.* 61) est petite et terminée par un bec dont la mandibule supérieure présente souvent une certaine mobilité. La mâchoire inférieure s'articule au crâne par l'intermédiaire de l'os carré.

La tête s'articule à la colonne vertébrale par un seul condyle, ce qui lui permet d'exécuter des mouvements de rotation très-étendus.

Le nombre des vertèbres est variable; chez les oiseaux dont le cou est très-long, leur nombre est considérable. Chez le cygne on compte vingt-trois vertèbres cervicales. Mais ordinairement, il en existe de douze à quinze. Elles sont très-mobiles les unes sur les autres, tandis que les vertèbres du dos se soudent de façon à donner plus de solidité au thorax et à fournir des points d'appui résistant aux muscles de l'épaule. Les

vertèbres lombaires et sacrées sont également soudées, les vertèbres coccygiennes sont petites et mobiles, les plumes de la queue s'insèrent sur la dernière.

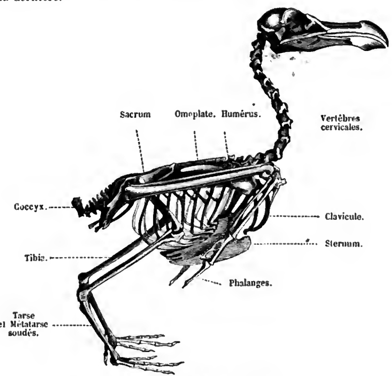


Fig. 62. — Squelette de Goëland.

Le sternum est très-considérable (*fig.* 62); il a la forme d'un large bouclier qui sur la ligne médiane, porte une carène nommée brechet, destinée à fournir des points d'attache aux muscles du vol; l'étendue du brechet est en raison directe de l'énergie du vol : aussi, chez l'autruche et le casoar, qui ne volent pas, cette carène n'existe pas.

L'omoplate est étroite, et s'appuie sur le sternum par l'intermédiaire de deux os, la clavicule, qui, se soudant avec celle du côté opposé, constitue la *fourchette*, et l'os coracoïdien, qui est situé au-dessous.

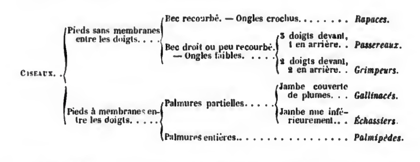
Les membres antérieurs constituent des espèces de rames, qui portent le nom d'ailes; le bras et l'avant-bras sont conformés comme d'habitude; les os du métacarpe sont soudés en un seul, et les grandes plumes de l'aile s'appuient sur lui.

Le tarse et le métatarse sont soudés en un seul os, terminé par une triple poulie sur laquelle s'attachent les doigts.

Le système nerveux des oiseaux est moins développé que celui des mammifères; les hémisphères cérébraux ne présentent pas de circonvolutions; le corps calleux et la protubérance annulaire manquent; les lobes optiques, au nombre de deux, prennent un grand accroissement et se montrent à découvert (Voy. *fig.* 29).

Nous avons déjà examiné les particularités que présentent les appareils digestif et respiratoire (Voy. paragr. 13 et 63, *fig.* 25).

Les caractères dont on se sert pour diviser la classe des oiseaux en ordres, familles et genres, sont tirés principalement de la conformation du bec et des pattes. Cuvier les divisa, comme il suit, en six ordres.



Oiseaux.	Pieds sans membranes entre les doigts.	Bec recourbé. — Ongles crochus.		*Rapaces.*
		Bec droit ou peu recourbé. — Ongles faibles.	3 doigts devant, 1 en arrière.	*Passereaux.*
			2 doigts devant, 2 en arrière.	*Grimpeurs.*
	Pieds à membranes entre les doigts.	Palmures partielles.	Jambe couverte de plumes.	*Gallinacés.*
			Jambe nue inférieurement.	*Échassiers.*
		Palmures entières.		*Palmipèdes.*

169. **Rapaces.** — L'ordre des rapaces se compose d'oiseaux à bec puissant, à ongles acérés; les uns sont diurnes, les autres nocturnes.

Les premiers ont les yeux dirigés de côté, la tête bien dégagée, le doigt externe dirigé en avant et presque toujours réuni à sa base au doigt médian par une très-petite membrane. Les aigles, les faucons, les milans (*fig.* 63), etc., font partie de ce groupe.



Fig. 63. — Milan.

Les rapaces nocturnes ont les yeux dirigés en avant, la tête grosse, le cou court, le doigt externe libre. Les hiboux, les chouettes sont conformés sur ce type.

170. **Passereaux.** — L'ordre des passereaux se compose d'une infinité de petits oiseaux. La forme de leur bec varie suivant leur régime; ceux qui,



Fig. 64. — Alouette.

comme l'alouette (*fig.* 64), le rossignol et les fauvettes, se nourrissent d'insectes ont un bec long et mince; ceux qui, comme le moineau, le pinson, etc., se nourrissent de graines, ont un bec court et conique, aussi les appelle-t-on des gros-becs, tandis que l'on nomme les autres des becs-fins. Les corbeaux, les pies, les geais font partie de cet ordre.

171. **Grimpeurs.** — L'ordre des grimpeurs se compose des oiseaux dont les pattes présentent deux doigts en avant, et deux en arrière, de façon à pouvoir serrer vigoureusement les branches. Les perroquets, les pics (*fig.* 65), les coucous sont des grimpeurs.



Fig. 65. — Pic épeiche.



Fig. 66. — Hocco.

172. **Gallinacés.** — L'ordre des gallinacés comprend tous nos oiseaux de basse-cour : poules, dindons, pintades, paons, hoccos (*fig.* 66), ainsi que les perdrix, les cailles, etc. Les pigeons font partie de cet ordre, mais constituent une famille à part.

173. **Échassiers.** — Dans l'ordre des échassiers se trouvent réunis un grand nombre d'espèces différant beaucoup de mœurs; il comprend les autruches et les casoars (*fig.* 67), qui



Fig. 67. — Casoar.

ne peuvent voler et vivent dans les déserts de l'Afrique ; d'autres échassiers vivent presque toujours sur le bord de l'eau. Les flammants, les ibis, les bécasses, les grues, les cigognes, les hérons sont dans ce cas.

Les oiseaux qui composent ce groupe se distinguent par leurs tarses très-élevés, par leurs jambes dépourvues de plumes à leur partie inférieure, ce qui leur donne l'air d'être montés sur des échasses. — Leur cou est généralement long et leur tête petite.

174. **Palmipèdes.** — Les palmipèdes se reconnaissent à leurs pattes ordinairement de longueur médiocre, et dont les trois doigts antérieurs, au moins, sont réunis par une membrane. — Les rames ainsi formées sont placées très-loin en arrière du corps de l'animal pour rendre la nage plus facile. — L'ordre des palmipèdes se divise en quatre familles : 1° les plongeurs, 2° les longipennes, 3° les totipalmes, 4° les lamellirostres.

Les plongeurs sont essentiellement aquatiques, la plupart ne volent pas. Les manchots présentent à la place d'ailes des espèces de moignons garnis de plumes écailleuses.

Les longipennes sont, au contraire, très-bien conformés pour le vol ; tels sont les hirondelles de mer, les mouettes, les goëlands, les albatros.

Les totipalmes ont non-seulement les trois doigts antérieurs réunis par une membrane; mais la palmure s'étend jusqu'au doigt postérieur. Les frégates, les pélicans, les fous appartiennent à cette division.

Les lamellirostres ont un bec garni de dentelures sur les bords ; on les divise en deux groupes, les canards et les harles. L'eider (*fig.* 68), qui fournit l'édredon, fait partie de cette famille.



Fig. 68. — Eider.

CLASSE DES REPTILES

LEUR DIVISION EN ORDRES.

175. — La classe des reptiles comprend tous les ***animaux vertébrés à sang froid, à circulation double et incomplète, et à respiration aérienne, qui, dans le jeune âge, sont semblables à ce qu'ils seront à l'état adulte.***

Chez les reptiles, la disposition de l'encéphale varie beaucoup d'un groupe à l'autre. La surface du cerveau est lisse et sans circonvolutions,

les lobes olfactifs et les lobes optiques sont aussi développés que les lobes cérébraux.

On divise les reptiles en trois ordres :

1° Les chéloniens ; 2° les sauriens ou lézards ; 3° les ophidiens ou serpents.

REPTILES	à membres	à carapace	*Chéloniens.*
		à écailles	*Sauriens.*
	sans membres		*Ophidiens.*

176. Chéloniens. — Les chéloniens se reconnaissent au premier abord par l'existence d'une carapace qui protége leur corps. Cette carapace est formée aux dépens du squelette (*fig.* 69). Les vertèbres

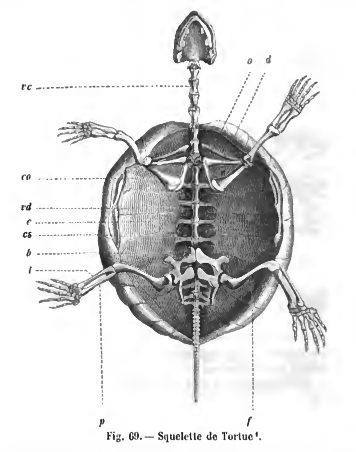


Fig. 69. — Squelette de Tortue[1].

[1] Squelette de tortue dont le plastron est enlevé. — *rc* vertèbres cervicales. — *vd* vertèbres dorsales. — *c* côtes. — *cs* côtes sternales ou pièces marginales de

dorsales se sont élargies; les côtes s'élargissent également et, en se rencontrant, forment la carapace; le sternum constitue le plastron. Ces deux parties réunies ressemblent à une espèce de boîte dans laquelle sont logés les membres, les muscles et les viscères. La peau qui recouvre tout le corps est quelquefois molle et délicate, d'autres fois elle devient cornée, d'une grande consistance et forme de larges plaques qui, chez une tortue de mer ou *caret*, constitue l'*écaille*. Les tortues se divisent en tortues terrestres, paludines, fluviatiles et marines; chez celles qui sont essentiellement aquatiques les pattes sont élargies en forme de rames; tandis que chez celles qui sont destinées à vivre sur la terre les pattes sont tronquées et arrondies du bout.

177. **Sauriens**. — L'ordre des sauriens se compose de reptiles qui par leur forme se rapprochent des lézards. Ce sont : les crocodiles, les iguanes, les caméléons, les lézards. Nous avons déjà eu l'occasion d'étudier (Voy. par. **44**, *fig.* 19) le système circulatoire des crocodiles, où le cœur présente quatre cavités. Les caméléons habitent en Afrique; ils se distinguent par la disposition de leurs doigts, au nombre de cinq et divisés en deux faisceaux opposables, mode d'organisation qui leur permet de serrer les branches des arbres sur lesquels ils se tiennent (*fig.* 70); ils se servent de leur langue, qui est très-longue, pour s'emparer des insectes dont ils font leur nourriture habituelle. A l'époque jurassique il existait sur la terre un grand nombre de sauriens gigantesques, tels que les ichthyosaures, les plésiosaures, etc., dont on retrouve les débris fossiles.

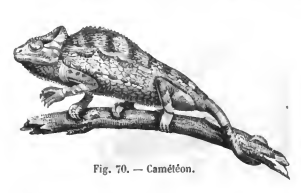


Fig. 70. — Caméléon.

178. **Ophidiens**. — Les ophidiens ou serpents ont un squelette composé presque essentiellement de vertèbres et de côtes. On divise ces animaux en deux groupes : les serpents venimeux et les serpents non venimeux.

Les premiers sont pourvus d'une glande spéciale située de chaque côté de la tête et destinée à sécréter le venin qui coule par un canal jusqu'à

la carapace. — *o* omoplate. — *cl* clavicule. — *co* os carcoïdien. — *b* bassin. — *f* fémur. — *t* tibia. — *p* péroné.

l'une des dents ou *crochet* de la mâchoire supérieure. Les serpents à sonnette ou crotales (*fig.* 71), les vipères, les trigonocéphales présentent ce mode d'organisation.

Les serpents non venimeux, tels que les boas, atteignent souvent une taille considérable.



Fig. 71. — Serpent à sonnette.

CLASSE DES BATRACIENS

LEUR DIVISION EN ORDRES.

179. La classe des batraciens se compose d'animaux qui, pendant les premiers temps de leur vie, respirent par des branchies, et par leur organisation ressemblent à des poissons, mais qui par les progrès de l'âge subissent de véritables métamorphoses. Dans leur première forme ils portent le nom de têtards, et vivent dans l'eau. Chez le têtard de la grenouille (*fig.* 72), le corps est globuleux et terminé par une queue longue et comprimée; les branchies placées de deux côtés du cou flottent dans le liquide ambiant, et les poumons n'existent qu'à l'état de bourgeons rudimentaires. Mais, au bout de quelque temps, la queue se raccourcit, les pattes se montrent, les branchies tombent, les poumons se développent ; l'animal,

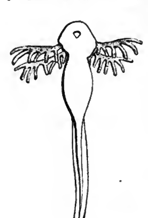


Fig. 72.
Têtard de Grenouille.

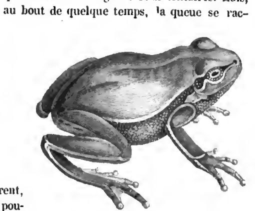


Fig. 73. — Reinette.

au lieu d'être essentiellement aquatique, devient apte à respirer dans l'air ; en un mot, le têtard devient grenouille.

Quelques batraciens conservent toujours leur queue, les tritons et les salamandres sont dans ce cas ; on les désigne sous le nom de batraciens ***urodèles***. D'autres, appelés ***pérennibranches***, conservent toujours leurs branchies extérieures, même lorsque les poumons ont acquis leur entier développement, tels sont les axolotts (*fig.* 74), les protées et les sirènes.

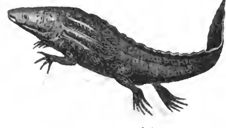


Fig. 74. — Axolott.

Les cécilies sont dépourvues de membres et ont longtemps été prises pour des serpents.

On peut donc résumer ainsi la classification des batraciens :

BATRACIENS	A membres	Branchies caduques	Avec queue	*Urodèles.*
			Sans queue	*Anoures.*
		Branchies persistantes		*Pérennibranches.*
	Sans membres			*Cécilies.*

CLASSE DES POISSONS.

LEUR DIVISION EN ORDRES.

180. ***Les poissons sont des vertébrés à respiration aquatique et à circulation simple.*** Leur squelette est tantôt osseux, tantôt cartilagineux, quelquefois même simplement membraneux. Dans le premier cas, les os ne présentent jamais de canal médullaire.

La structure de la tête est très-compliquée (*fig.* 75), et le nombre des os qui la composent très-considérable. Les vertébrés sont remarquables par leur forme biconcave ; sur la ligne médiane du corps on trouve un certain nombre d'os appelés inter-épineux, qui s'appuient sur des apophyses épineuses des vertèbres, et par leur extrémité opposée s'articulent avec les rayons des nageoires médianes.

Indépendamment de ces nageoires impaires, il en existe ordinairement d'autres disposées par paires et représentant les membres des animaux supérieurs.

La respiration se fait au moyen de branchies situées en arrière de la tête de chaque côté du corps. L'eau entre par la bouche et sort par deux ouvertures, appelés les ouïes, que l'on voit pendant la vie de l'animal

s'ouvrir et se fermer alternativement. Presque tous les poissons présentent dans l'intérieur de la cavité viscérale une poche nommée *vessie natatoire*, tantôt complètement fermée, tantôt communiquant avec l'extérieur par un canal. Les usages de cette poche ne sont point parfaitement connus.

Le cerveau présente de grandes différences, suivant les espèces où on l'observe; en général, il se compose d'une série de renflements disposés en chapelet et représentant les lobes olfactifs, cérébraux, optiques et le cervelet.

La peau des poissons est quelquefois nue, le plus souvent elle est couverte d'écailles dont les formes varient avec les espèces. Le sens du toucher s'exerce alors à l'aide d'appendices appelés barbillons, placés autour de la bouche.

Les poissons se divisent en deux groupes, d'après la nature de leur squelette, tantôt osseux, tantôt cartilagineux.

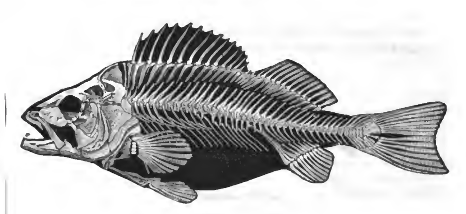


Fig. 75. — Squelette de Poisson.

181. **Poissons osseux.** — Les poissons osseux sont très-nombreux en espèces et se subdivisent en :

1° *Plectognates*, où la mâchoire supérieure, au lieu d'être libre, est soudée au crâne ;

2° *Lophobranches*, où les branchies, au lieu d'être disposées en dents de peigne, ont la forme de houppes ;

3° *Acanthoptérygiens*, chez lesquels la mâchoire supérieure est mobile, et la première nageoire dorsale soutenue par des rayons osseux. Les perches, maquereaux, etc., sont dans ce cas ;

4° *Malacoptérygiens abdominaux*, où au contraire ces rayons de la première nageoire dorsale sont cartilagineux, les nageoires ventrales

6

sont situées en arrière des pectorales, et non attachées aux os de l'épaule, comme on le voit chez le brochet, le saumon, etc.;

5° *Malacoptérygiens subbranchiaux*, où les nageoires ventrales sont suspendues aux os de l'épaule, comme chez la morue, les plies et les soles;

6° *Malacoptérygiens apodes*, où il n'existe pas de nageoires ventrales, comme chez les anguilles.

182. **Poissons cartilagineux.** — Les poissons cartilagineux ou *chondroptérygiens* se divisent, d'après la structure de l'appareil branchial, en :

1° *Chondroptérygiens à branchies libres* à leur bord externe, comme chez les poissons osseux (esturgeon);

2° Et *Chondroptérygiens à branchies fixes*, où le bord externe est adhérent aux téguments de façon à subdiviser la chambre branchiale en autant de loges qu'il y a de branchies; une ouverture particulière correspond à chaque loge. Ces poissons se subdivisent en deux ordres, les *sélaciens* et les *cyclostomes*.

Chez les premiers, les mâchoires sont disposées pour la mastication: ce sont les raies, les squales ou requins (*fig.* 76); chez les autres, la bouche

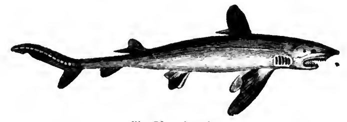


Fig. 76. — Requin.

est disposée pour la succion, c'est un véritable suçoir: les lamproies font partie de ce dernier groupe.

EMBRANCHEMENT DES ANNELÉS.

183. Les annelés sont des animaux sans vertèbres à symétrie binaire et latérale, composés de parties qui se répètent dans le sens de la longueur; tout leur corps est formé d'anneaux placés à la suite les uns des autres, chaque anneau donnant naissance à une ou deux paires d'appendices. Quelques-uns de ces anneaux peuvent se souder, et c'est de cette soudure et de l'atrophie de quelques-unes des paires d'appendices latéraux que résultent la diversité des types d'annelés. Nous avons déjà vu

(parag. 94) de quels éléments se composait leur système nerveux (*fig.* 77) et comment il différait de celui des autres animaux.

Pour diviser les annelés on a pris en considération le nombre d'articulations dont le corps se compose ; chez les uns, l'animal entier est formé d'une série d'articles, et les pattes n'existent pas ou sont rudimentaires : on en a fait le sous-embranchement des ***vers;*** chez les autres, il existe des pattes articulées : on les a réunis dans le sous-embranchement des ***articulés.***

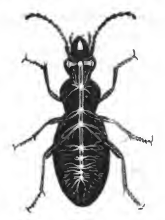


Fig. 77.
Système nerveux d'Insecte.

Les articulés se divisent de la manière qu'il suit, en quatre classes :

ARTICULÉS.	Respiration aérienne.	Petit nombre d'articles.	Corps à 3 divisions.	*Insectes.*
			Corps à 2 divisions.	*Arachnides*
		Grand nombre d'articles		*Myriapodes.*
	Respiration aquatique			*Crustacés.*

CLASSE DES INSECTES

PRINCIPAUX GROUPES QUI LES COMPOSENT

184. La classe des insectes se compose de tous les animaux articulés dont le corps présente une tête, un thorax et un abdomen distincts, qui sont pourvus de trois paires de pattes, dont la respiration s'effectue à l'aide de trachées, et dont la circulation se fait au moyen d'un vaisseau dorsal.

Sur la tête on remarque les yeux, les antennes et l'armature buccale. Les yeux sont composés par l'agglomération d'une multitude de petits yeux ou ***stemmates,*** ayant chacun une cornée, un corps vitré, une couche pigmentaire et un nerf spécial. Chez quelques insectes, ces stemmates sont au nombre de vingt à vingt-cinq mille. Le thorax porte les pattes et les ailes; il se divise en ***prothorax, mésothorax,*** et ***métathorax,*** chacune de ces parties donne naissance à une paire de pattes.

Les ailes naissent des deux derniers segments seulement, de sorte qu'il n'en existe jamais plus de deux paires qui peuvent être toutes deux membraneuses et propres au vol ; d'autres fois celles de la première paire s'épaississent, deviennent dures et rigides, prennent le nom d'élytres et ne servent plus qu'à protéger les ailes véritables de la deuxième paire.

Les insectes se nourrissent tantôt de matières végétales ou animales

dures et résistantes, tantôt des sucs des fleurs, tantôt du sang d'autres animaux ou des humeurs des plantes; la conformation des pièces dont leur bouche est armée varie suivant les fonctions que cette partie doit remplir.

Chez les insectes carnassiers ou chez ceux qui doivent déchirer les feuilles ou le bois, les mandibules ou mâchoires sont très-fortes et servent à couper et à déchirer.

Chez les insectes suceurs, tels que les punaises, ces mêmes parties s'allongent beaucoup, forment une sorte de trompe dans laquelle se trouvent de petites lancettes destinées à percer les tissus.

Chez les papillons, ces stylets aigus n'existent pas, et la bouche est simplement garnie d'une longue trompe.

Le système nerveux varie beaucoup suivant que les divers ganglions de la chaîne nerveuse se trouvent plus ou moins soudés entre eux.

Les insectes au sortir de l'œuf ne ressemblent pas à ce qu'ils seront à l'état adulte; ils présentent des phénomènes que nous avons déjà vus chez les batraciens, c'est-à-dire qu'ils subissent des métamorphoses.

Au moment de l'éclosion, ils sont à l'état de larve et ressemblent à une petite chenille; le nombre des pattes est considérable, le nombre des ganglions nerveux correspond à celui des anneaux de l'animal; ils restent ainsi quelque temps et changent plusieurs fois de peau; (*ex :* le ver à soie ou chenille du bombyx du mûrier, *fig.* 78). Ils passent ensuite à l'état de nymphe ou *chrysalide* (*fig.* 79), le corps se raccourcit, s'enveloppe d'une membrane plus résistante sous laquelle les parties extérieures de l'insecte parfait se voient; en même temps, de grands changements organiques se font à l'intérieur; la chaîne ganglionnaire se modifie par la soudure de plusieurs des masses nerveuses qui la composent, le nombre des pattes se réduit à trois paires. Les or-

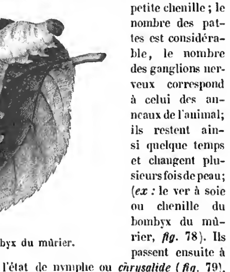



Fig. 78. — Chenille du Bombyx du mûrier.



Fig. 79.
Chrysalide du Bombyx du mûrier.

ganes de la reproduction apparaissent; enfin l'insecte rejette son enveloppe et sort à l'état parfait. Le ver à soie sort de sa chrysalide à l'état de papillon.

Quelques insectes entourent leur chrysalide d'une gaîne, d'un cocon qu'ils filent préalablement, comme on le remarque pour le ver à soie.

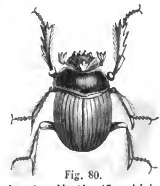
Quelquefois les métamorphoses ne sont pas aussi complètes que nous venons de le dire; alors, l'insecte à l'état de larve est presque aussi parfait qu'il le sera à l'état adulte : les sauterelles sont dans ce cas.

Les puces ne subissent aussi que des métamorphoses incomplètes.

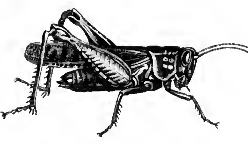
Parmi les abeilles, les reines et les mâles seules parcourent toutes les phases de leur développement. Les ouvrières ne peuvent se reproduire, elles restent stériles toute leur vie.

Le nombre des espèces d'insectes est immense; pour y établir des coupes, on s'est basé surtout sur l'étude de leur développement et sur la disposition des pièces de la bouche; on y a ainsi formé les dix ordres suivants : 1° *Coléoptères;* — 2° *orthoptères;* — 3° *névroptères;* — 4° *hyménoptères;* — 5° *lépidoptères;* — 6° *hémiptères;* — 7° *diptères;* — 8° *rhipiptères:* — 9° *anoplures;* — 10° *thysanoures.*

185. **Coléoptères.** — Les coléoptères se nourrissent de substances solides, et présentent des mâchoires et des mandibules propres à les diviser. Ils sont pourvus d'une paire d'élytres et d'une paire d'ailes membraneuses. Ils subissent des métamorphoses complètes. Les hannetons, les carabes ou chevaux dorés, les cantharides, les scarabées (*fig.* 80) font partie de ce groupe.


Fig. 80.
Insecte coléoptère (Scarabée).

186. **Orthoptères.** — Les orthoptères diffèrent des précédents par leurs métamorphoses incomplètes. En effet, la larve ne diffère de l'insecte parfait que par l'absence d'ailes. Les sauterelles, les criquets (*fig.* 81), les perce-oreilles, les grillons sont les principaux représentants de cet ordre.


Fig. 81. — Criquet.

187. **Névroptères.** — Les névroptères présentent quatre ailes membraneuses,

comme on le remarque chez les libellules, les éphémères (*fig.* 82), les agrions, les fourmi-lions, etc.



Fig. 82. — Éphémère.

188. **Hyménoptères.** — Les hyménoptères sont aussi pourvus de mandibules conformées à peu près comme celles des précédents; mais ils ne s'en servent pas pour la mastication, et ne se nourrissent que de liquides; leurs ailes, au nombre de quatre, sont divisées en un certain nombre de compartiments par des nervures cornées; ils subissent des métamorphoses complètes. Les fourmis, les abeilles (*fig.* 83), les guêpes, les bourdons sont dans ce cas.



Fig. 83.
Insecte hyménoptère (Abeille).

189. **Lépidoptères.** — L'ordre des lépidoptères comprend tous les papillons (*fig.* 84). Leur bouche est garnie d'une trompe, leurs ailes sont opaques et colorées par une poussière écailleuse. Leurs métamorphoses sont complètes. Les uns sont diurnes, les autres nocturnes. Le bombyx de la soie, qui est d'une si grande utilité, et la pyrale, l'un des fléaux de la vigne, sont rangés dans cet ordre.

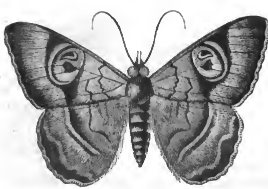


Fig. 84. — Papillon érèbe.

190. **Hémiptères.** — Les hémiptères présentent aussi une trompe; mais dans l'intérieur de cet organe se trouvent des stylets aigus. Leurs métamorphoses sont incomplètes. Les punaises, les cigales font partie de ce groupe.

191. **Diptères**. — Les diptères ont une bouche disposée pour la succion, et une seule paire d'ailes membraneuses, comme on l'observe chez les mouches, les taons et les œstres (*fig.* 85).



Fig. 85.
Insecte diptère (Œstre).

192. **Rhipiptères**. — Les rhipiptères n'ont que deux ailes plissées en éventail. Les stylops et les xénops font partie de cet ordre.

193. **Anoplures**. — Les anoplures n'ont pas d'ailes, et ont la bouche disposée pour la succion : tels sont les poux et les ricins, qui ne subissent pas de métamorphoses.

194. **Thysanoures**. — Les thysanoures sont de même, mais portent à l'extrémité de l'abdomen de longs appendices. Les lépismes, que l'on trouve entre les feuillets des livres humides, se rangent dans cet ordre.

CLASSE DES ARACHNIDES.

195. La classe des arachnides comprend les animaux articulés dont le corps ne présente que deux divisions; en effet, la tête est confondue avec le thorax et dépourvue d'antennes. Ils ont quatre paires de pattes et jamais d'ailes. Leur respiration peut s'effectuer à l'aide de trachées ou bien de poches pulmonaires logées dans l'intérieur de l'abdomen; aussi divise-t-on les arachnides en *pulmonaires* et *trachéens*. Chez quelques araignées, ces deux modes de respiration existent simultanément.

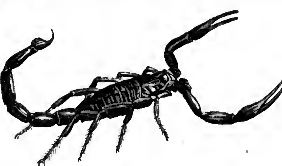


Fig. 86. — Scorpion.

196. **Arachnides pulmonaires**. — Le scorpion (*fig.* 86) se range dans la première de ces divisions. Cet animal est pourvu d'un appareil venimeux, situé à l'extrémité d'une longue queue articulée. La piqûre des scorpions des pays chauds est très-dangereuse. Les théridions (*fig.* 87), les mygales et les autres araignées sont

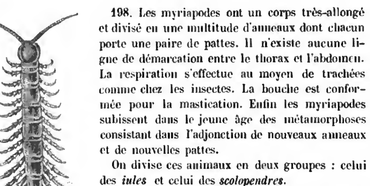


Fig. 87. — Théridion.

également pulmonaires; quelques-unes de ces dernières atteignent une taille vraiment gigantesque.

197. **Arachnides trachéens.** — Les arachnides trachéens sont très-répandus dans nos pays; les faucheurs, etc., sont dans ce cas. L'animal qui, par sa présence et sa multiplication sous la peau, constitue la maladie appelée gale fait partie de cette division.

CLASSE DE MYRIAPODES.



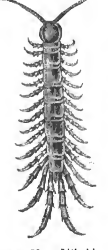


Fig. 88. — Lithobie.

198. Les myriapodes ont un corps très-allongé et divisé en une multitude d'anneaux dont chacun porte une paire de pattes. Il n'existe aucune ligne de démarcation entre le thorax et l'abdomen. La respiration s'effectue au moyen de trachées comme chez les insectes. La bouche est conformée pour la mastication. Enfin les myriapodes subissent dans le jeune âge des métamorphoses consistant dans l'adjonction de nouveaux anneaux et de nouvelles pattes.

On divise ces animaux en deux groupes : celui des *iules* et celui des *scolopendres*.

Les iules ont le corps arrondi et deux paires de pattes à chaque anneaux; leurs antennes sont courtes et obtuses.

Les scolopendres ont le corps aplati, une seule paire de pattes par anneau et des antennes longues et pointues; *ex. :* la lithobie (*fig.* 88).

CLASSE DES CRUSTACÉS.

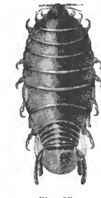


Fig. 89.

199. Les crustacés sont des animaux articulés, à respiration aquatique et branchiale. Nous avons déjà étudié les organes de la circulation et de la respiration, ainsi que le système nerveux de ces animaux. (Voy. parag. 49, 66, 95.) Leur squelette tégumentaire est dur et résistant; ils peuvent cependant s'en dépouiller, et en changent à certaines époques de l'année. Les anneaux dont le corps se compose peuvent être tous libres; d'autres fois la plupart sont soudés ensemble de façon à ne former qu'une seule pièce. Chez un anilocre (*fig.* 89), un cloporte, par exemple, les anneaux sont distincts; chez un crabe (*fig.* 90), la plu-

part sont soudés, et cependant le plan organique est toujours le même. Les appendices des anneaux sont très-nombreux et varient de formes suivant les usages qu'ils doivent remplir : les premiers constituent les antennes, ou portent les yeux ; les autres servent à la mastication, les suivants à la locomotion ; enfin les derniers sont destinés, tantôt à former des organes de natation, tantôt à servir pour la respiration ou la reproduction.

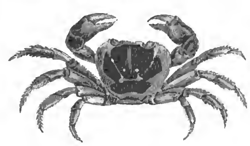


Fig. 50. — Crabe gécarcin.

La tête est ordinairement formée de sept anneaux soudés en un seul ; elle peut être distincte du thorax ou soudée à cette partie. Les pattes naissent des anneaux thoraciques : chez les crevettes des ruisseaux, les talitres, on en compte sept paires ; chez les crustacés supérieurs, tels que les écrevisses et les crabes, cinq paires. Les anneaux de l'abdomen peuvent être bien développés, comme chez le homard, la langouste, ou rudimentaires et reployés sous la carapace, comme chez les crabes.

La classe des crustacés doit se diviser en deux sous-classes.

La première comprend tous les crustacés ordinaires à sexes séparés.

La seconde comprend seulement les *cirrhipèdes*, qui sont hermaphrodites, qui vivent enfermés dans une sorte de coquille, et qui sont fixés aux corps étrangers par un pédoncule dorso-frontal.

Les crustacés proprement dits se subdivisent en deux légions.

Les *podophthalmaires*, dont les yeux sont toujours pédonculés et mobiles, qui portent une carapace, enfin dont la bouche est armée de six paires d'appendices.

Les *oligognathes*, dont les yeux sont toujours immobiles et non pédonculés, qui portent rarement une carapace, et dont la bouche est garnie de trois ou quatre paires d'appendices.

La division des podophthalmaires comprend la plupart des crustacés ; elle se subdivise en deux ordres : les décapodes et les stomapodes.

Les *décapodes* ont pour principaux représentants les crabes, les écrevisses, les homards. Leurs branchies sont intérieures.

Les uns, comme les crabes, ont l'abdomen court, reployé sous le thorax, et sans nageoire à l'extrémité ; ils constituent les *décapodes brachyures*.

Les autres ont l'abdomen très-développé, servant puissamment à la natation, et terminé par une nageoire, comme chez l'écrevisse et le

palémon (*fig.* 91). Ces crustacés forment le groupe des ***décapodes macroures.***

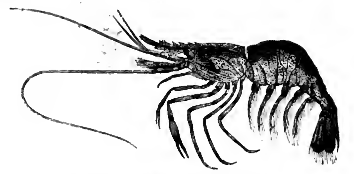


Fig. 91. — Crustacé macroure (Palémon).

Les *stomapodes* ont leurs branchies flottant sous l'abdomen, ou nulles. Les squilles peuvent être prises pour type de cet ordre.

Les *oligognathes* (Voy. *fig.* 89) ont la tête distincte du thorax, qui est en général formé de sept anneaux portant chacun une paire de pattes. La respiration se fait à l'aide de pattes modifiées et transformées en une sorte de branchies extérieures. Nous citerons comme faisant partie de ce groupe les anilocres, les cloportes, et les trilobites, qui aujourd'hui n'existent plus, mais peuplaient les mers des premières époques géologiques.

VERS

PRINCIPAUX GROUPES QUI LES COMPOSENT.

200. Chez les vers il n'existe plus de membres articulés, la peau est souple ou membraneuse et ne s'encroûte pas de chitine ou de sels calcaires. L'appareil circulatoire est toujours clos et le sang ne remplit pas les lacunes; on les divise en rotateurs, annélides et helminthes.

VERS.	Pourvus d'organes rotateurs.		*Rotateurs.*
	Pas d'organes rotateurs.	Chaîne nerveuse ganglionnaire.	*Annélides.*
		Chaîne nerveuse lisse.	*Helminthes.*

201. **Rotateurs.** — Les animaux qui font partie de la classe des rotateurs sont d'une petitesse extrême, et avant la découverte du microscope leur existence n'était même pas soupçonnée. Leur corps semi-transparent offre des traces assez distinctes de divisions annulaires, la bouche en oc-

cupe l'extrémité; autour de cet orifice sont disposés des cils vibratiles dont le mouvement rotateur est continuel.

Les *rotifères* (*fig.* 92) sont devenus célèbres par les expériences de Spallanzani, qui parvint à les conserver pendant plusieurs années, après les avoir complétement desséchés et à leur rendre ensuite la vie en les humectant avec de l'eau.



Fig. 92. — Rotifère.

202. **Annélides**. — Les annélides se subdivisent en *Annélides tubicoles*, — *Annélides errants*, — *Annélides terricoles*, — *Annélides suceurs*.

Les premiers portent leurs organes de respiration à la partie antérieure du corps, ils vivent dans des tubes calcaires et n'en sortent que leur tête ornée d'appendices branchiaux en forme de panache.

Les serpules sont dans ce cas (*fig.* 93).

Les annélides errants, tels que les eunices et les arénicoles, vivent dans le sable; leurs branchies ont la forme de houppes placées par paires le long du corps.

Les annélides terricoles vivent dans la terre; le lombric ou ver de terre représente ce groupe.

Les annélides suceurs comprennent les sangsues.



Fig. 93. — Serpule.

203. **Helminthes**. — La classe des *helminthes* se compose de vers intestinaux et d'autres êtres d'une organisation analogue; la plupart ne peuvent vivre que dans l'intérieur d'autres animaux; il en existe qui se logent dans le foie (douve), dans le cerveau (cœnure) dans l'intérieur de l'œil, dans le tissu cellulaire des muscles (trichina spiralis).

La plupart des vers intestinaux subissent une série de transformations remarquables; chacune de ces métamorphoses a besoin d'un milieu spécial pour s'effectuer. Ainsi, le *tænia serrata* ou ver solitaire du chien, pond des œufs qui ne peuvent éclore que dans le corps du mouton, mais les larves ainsi produites ne peuvent arriver à leur état parfait que dans l'organisme du chien.

EMBRANCHEMENT DES MOLLUSQUES

PRINCIPAUX GROUPES QUI LES COMPOSENT.

204. L'embranchement des mollusques se compose d'animaux invertébrés à système nerveux formant un collier œsophagien mais pas une chaîne ventrale; la bouche et l'anus sont ordinairement rapprochés l'un de l'autre, et l'axe du corps paraît suivre une ligne courbe. Le corps ne présente aucune trace d'anneaux. Chez les uns, le système nerveux est bien caractérisé, chez les autres il est nul ou du moins, nos moyens d'investigation ne nous en ont point encore fait découvrir l'existence; c'est sur ce fait que l'on s'est basé pour séparer, des mollusques proprement dits, les ***molluscoïdes*** dont le système nerveux est rudimentaire.

La peau des mollusques, toujours molle et visqueuse, forme souvent des replis qui enveloppent plus ou moins complétement le corps et constituent ce que l'on nomme alors le ***manteau***.

Cette peau molle est en général protégée par une sorte de cuirasse pierreuse nommée coquille, formée par la solidification de parties épidermiques d'abord vivantes; aussi, si on dissout la coquille dans un acide, restera-t-il une trame organique.

Les coquilles peuvent être extérieures ou intérieures, les premières seules sont colorées. Quelques coquilles présentent une couche de nacre. Les perles sont des corps de la nature de la nacre, seulement cette substance au lieu de s'étendre en lame, se réunit en petites concrétions chez l'aronde perlière.

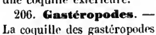
Les organes de la locomotion varient beaucoup chez les mollusques. Quelques-uns portent à l'extrémité antérieure du corps, autour de la bouche, de longs et forts tentacules garnis de ventouses, qui leur servent à s'accrocher aux corps environnants; à raison de ce mode d'organisation on les a nommés céphalopodes; d'autres marchent en rampant sur une sorte de pied charnu, etc. On s'est servi de ces caractères pour diviser les mollusques en classes.

TÊTE DISTINCTE. . . .	Tête entourée de bras ou tentacules locomoteurs.		*Céphalopodes.*
	Pas de bras.	Nageoires autour de la tête. . .	*Ptéropodes.*
		Un pied charnu.	*Gastropodes.*
TÊTE NON DISTINCTE. .	A branchies.		*Acéphales.*
	Bras ciliés pour branchies.		*Brachiopodes.*

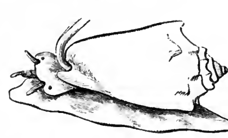
205. **Céphalopodes** — Parmi les céphalopodes on remarque les poulpes, les calmars (*fig.* 94), qui présentent une coquille interne qui

chez la seiche constitue ce que l'on appelle l'os de seiche. D'autres, comme les nautiles, les ammonites offrent une coquille extérieure.

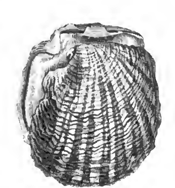

Fig. 94. — Calmar.



206. **Gastéropodes**. — La coquille des gastéropodes est d'une seule pièce, en forme de cornet, et généralement enroulée sur elle-même ; la respiration est branchiale chez la plupart, et pulmonaire chez le limaçon. Parmi les animaux de cette classe, les uns sont marins, tels que les cônes, les volutes (*fig.* 95), et c'est le plus grand nombre ; d'autres habitent les eaux douces, comme les planorbes et les lymnées ; enfin les autres sont terrestres, comme la limace et le colimaçon.


Fig. 95. — Volute.

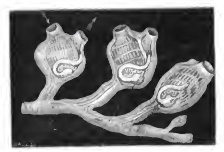
207. **Acéphales**. — Les mollusques acéphales sont pourvus d'une coquille à deux valves (*fig.* 96), réunies par une charnière qui leur permet de s'ouvrir ou de se fermer ; un ligament élastique, placé à la charnière, tend toujours à ouvrir la coquille lorsque les muscles ne se contractent pas pour la fermer ; les huîtres, les moules, les anodontes se rangent dans cette classe.


Fig. 96. — Aronde perlière.

208. **Brachiopodes**. — Les brachiopodes sont aujourd'hui peu abondants dans nos mers, mais, à certaines époques géologiques, le nombre des espèces et des genres était énorme, en même temps qu'ils atteignaient souvent une taille considérable.

MOLLUSCOÏDES.

209. Les molluscoïdes établissent le passage entre les mollusques et les coralliaires. Ils présentent un tube digestif ouvert à ses deux bouts, et un


Fig. 97. — Ascidies.

appareil branchial bien développé; leur système nerveux est nul ou rudimentaire, ils se divisent en deux classes :

1° Les tuniciers (*fig.* 97);

2° Les bryozoaires.

La plupart de ces animaux sont marins, quelques-uns cependant habitent les eaux douces. Tous sont de très-petite taille.

EMBRANCHEMENT DES ZOOPHYTES OU RAYONNÉS.

PRINCIPAUX GROUPES QUI LES COMPOSENT.

210. Les zoophytes sont des animaux d'une organisation très-simple, ils présentent presque toujours, soit dans leur corps lui-même, soit dans ses appendices, une disposition rayonnante, ce qui les a fait comparer à des plantes.

Leur système nerveux est ou rudimentaire ou nul, et il n'existe, comme organes des sens, que des petites taches colorées que l'on regarde comme les analogues des yeux. On divise les zoophytes en cinq classes : Les *échinodermes*, — les *acalèphes*, — les coralliaires ou *polypes*, — les *infusoires*, — les *éponges*.

211. **Échinodermes.** — Les échinodermes se divisent eux-mêmes en trois groupes principaux, les *holothuries*, les *oursins* et les *astéries*.


Fig. 98. — Astérie.

Le corps des astéries (*fig.* 98) a la forme d'une étoile, aussi appellet-on ces animaux des étoiles de mer; la plupart ont une charpente solide, d'une structure très-compliquée, leur bouche est située presque au centre de la face inférieure du corps.

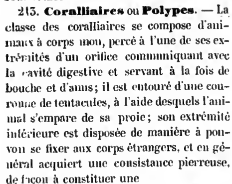
Les oursins sont des échinodermes globuleux, revêtus d'un test calcaire hérissé d'épines servant à la locomotion; à côté de ces épines sont des ouvertures destinées à livrer passage à un long tube terminé par une ventouse qui permet à l'animal de progresser sur des corps complétement lisses; les oursins

présentent une armature buccale formée de pièces solides et d'une organisation très-compliquée.



Fig. 99. — Méduse (Rhizostome).

212. **Acalèphes.** — La classe des acalèphes (*fig.* 99) comprend toutes les *méduses* que l'on voit, sur nos côtes, flotter dans la mer sous la forme d'une cloche de matière gélatineuse et transparente; leur organisation est très-simple et leurs principaux organes se réduisent à un estomac communiquant au dehors par un seul orifice.



213. **Coralliaires** ou **Polypes**. — La classe des coralliaires se compose d'animaux à corps mou, percé à l'une de ses extrémités d'un orifice communiquant avec la cavité digestive et servant à la fois de bouche et d'anus; il est entouré d'une couronne de tentacules, à l'aide desquels l'animal s'empare de sa proie; son extrémité inférieure est disposée de manière à pouvoir se fixer aux corps étrangers, et en général acquiert une consistance pierreuse, de façon à constituer une sorte de loge calcaire appelée *polypier*. L'actinie ou anémone de mer (*fig.* 100) appartient à cette classe. La plupart des polypes habitent la mer. Quelques-uns, tels que les hydres (Voy. parag. 24, *fig.* 8), se trouvent dans les eaux douces.



Fig. 100. — Actinie.

Le corail (*fig.* 101), si employé en bijouterie, appartient à cette classe; on le pêche sur les côtes d'Algérie. Quelques espèces de polypes se développent avec une si grande rapi-



Fig. 101. — Corail.

dité, que, sur certains points des mers tropicales, ils forment de véritables îles ou des récifs.

214. **Infusoires**. — Les infusoires (*fig.* 102) sont de petits animaux que le microscope nous a fait connaître, et qui se développent en quantité dans l'eau contenant des débris de corps organisés. L'air charrie des myriades de germes d'infusoires, les répand partout, et ils se développent lorsqu'ils trouvent réunies les conditions nécessaires à leur existence. La forme des infusoires est très-variable, leur corps est couvert de petits cils vibratiles, ils peuvent se reproduire au moyen d'œufs, ou par la division de leur corps en deux ou plusieurs fragments, dont chacun continue à vivre et devient un animal parfait.

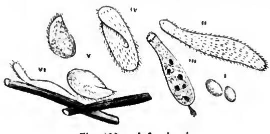


Fig. 102. — Infusoires[1].

215. **Spongiaires**. — La classe des spongiaires se compose des éponges et d'autres animaux d'une organisation tellement dégradée qu'ils n'ont de l'animalité que la reproduction au moyen d'œufs qui donnent naissance à des larves ciliées. Ces larves, après avoir nagé quelque temps au moyen de leurs cils vibratiles, se fixent sur un corps étranger, deviennent immobiles, se déforment, se creusent de canaux où l'eau circule. Dans leur substance se développent des filaments cornés et des spicules, soit cornées, soit siliceuses. Ce sont ces masses qui donnent naissance à des espèces d'œufs d'où sortent les larves ciliées.

L'éponge commune se trouve dans l'océan Atlantique, sur les côtes d'Amérique; pour la préparer aux usages domestiques il suffit de la laver avec de l'eau qui enlève la matière animale dont les filaments cornés sont recouverts. Il existe un genre d'éponges fluviatiles auquel on a donné le nom de spongille.

[1] Infusoires vus au microscope. — I Monades. — II Tachélie anas. — III Enchélyde — IV Paramécie. — V Kolpode. — VI Tachélie fasciolaire marchant sur des végétaux microscopiques.

BOTANIQUE

ORGANES DE LA PLANTE

Parties élémentaires ou tissus qui les composent. — Composition chimique de ces tissus.

1. La *Botanique* est la partie de l'histoire naturelle qui traite des végétaux.

Les *végétaux* sont des êtres organisés, pourvus de fonctions de nutrition, mais privés de fonctions de relation. *Ils se nourrissent et se reproduisent, mais ils ne sentent ni ne se meuvent volontairement.* Nous avons d'ailleurs insisté sur les caractères qui séparent le règne végétal du règne animal (Voy. *Zool.*, parag. 2) et nous n'y reviendrons pas ici.

De même que pour les animaux, nous devons étudier chez les végétaux :

a La disposition, la structure et les rapports de leurs organes, c'est-à-dire leur *anatomie ;*

b Le rôle de ces organes et les fonctions qu'ils remplissent, c'est-à-dire leur *physiologie ;*

c La forme et les caractères de chaque végétal, examinés en particulier et comparativement à ceux des autres végétaux.

2. **Organes de la plante.** — Si l'on examine une plante prise parmi les végétaux supérieurs, on voit qu'elle se compose d'un certain nombre de parties bien distinctes, que l'on connaît vulgairement sous les noms de tige, racine, feuilles, fleurs, etc. Chacune de ces parties semble elle-même formée par la réunion de diverses pièces spéciales. Dans les fleurs, par exemple, on distingue les pétales, les étamines, etc. Dans la tige, on reconnaît facilement l'existence de plusieurs couches, dont la plus superficielle, ou écorce, se détache parfois très-facilement. Mais la division ne s'arrête pas là ; on peut pousser l'analyse beaucoup plus loin et reconnaître que chacune de ces parties, que l'on croyait simple, se compose d'une infinité de particules qui paraissent indivisibles, et portent pour cette raison le nom d'*organes élémentaires*.

ORGANES ÉLÉMENTAIRES.

3. Ce n'est pas à l'œil nu que l'on peut étudier la structure intime des végétaux ; les organes élémentaires échappent, par leur petitesse, à

nos moyens d'investigations ordinaires; il faut avoir recours au microscope. C'est à l'aide de cet instrument que l'on constate que les plantes sont constituées par la réunion de *cellules*, de *fibres* et de *vaisseaux*. Quelques végétaux d'une organisation extrêmement simple, tels que les champignons, les algues, etc., ne se composent que de cellules; aussi portent-ils le nom de *plantes cellulaires*, par opposition aux plantes *vasculaires*, qui sont formées à la fois par des cellules, des fibres et des vaisseaux.

4. **Tissu cellulaire**. — Le tissu cellulaire peut être considéré comme le point de départ et l'élément primordial de tout organisme végétal : il consiste en une foule de petites vésicules, formées par une membrane continue et groupées côte à côte. Quand aucun obstacle ne vient gêner leur développement, elles affectent une forme sphérique, comme chez la joubarbe (*fig.* 1). Mais le plus souvent elles sont tellement serrées les unes contre les autres que leurs parois se compriment mutuellement. Elles prennent alors une forme polyédrique, comme on le remarque dans la moëlle du sureau (*fig.* 2). Dans ce cas, elles adhèrent fortement ensemble, et leurs parois se confondent si intimement qu'on ne saurait apercevoir aucune trace de leur séparation première. Lorsque les cellules se compriment ainsi mutuellement, elles peuvent prendre des formes d'une régularité presque géométrique, telles que celles d'un cube, d'un prisme, etc... D'autres fois les utricules ressemblent à de petits tonneaux placés côte à côte et empilés les uns sur les autres. Ou bien elles se développent plus rapidement sur divers points et présentent des saillies; on dit alors qu'elles sont *rameuses*. On peut observer cette disposition chez la fève de marais (*fig.* 3). Dans ce cas elles ne se touchent que par un certain nombre de points et interceptent de petits espaces vides que l'on désigne sous le nom de *lacunes* ou *méats l,l* (*fig.* 3).

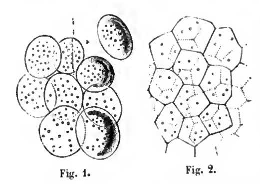


Fig. 1. Fig. 2.

Fig. 3.

5. Les parois des cellules peuvent être parfaitement homogènes (*fig.* 3), mais le plus souvent elles présentent soit de petites ponctuations, et sont dites *ponctuées* (*fig.* 1 et 2), soit de



Fig. 4.

petites lignes dirigées transversalement ou obliquement, comme chez certaines cellules du sureau (*fig.* 4); elles sont alors appelées *rayées*.

Ces petits points semblent, au premier abord, autant de petites ouvertures; mais, si on y regarde de plus près, on reconnaît que cette apparence est due à ce que la cellule se compose de deux ou plusieurs membranes, dont l'une, extérieure, est parfaitement continue, tandis que l'intérieure s'interrompt sur certains points, et ce sont ces solutions de continuité de la membrane ou des membranes internes qui vues à travers la membrane externe produisent ces ponctuations ou ces réticulations. Quelquefois la membrane interne se fracture, suivant une ligne régulière disposée soit en cercle (*fig.* 5), soit en spirale (*fig.* 6), comme chez le gui (*Viscum album*). Dans ce cas la cellule paraît doublée d'une sorte de bandelette enroulée.


Fig. 5.


Fig. 6.

Le nombre des couches qui constituent les parois des utricules peut varier beaucoup; quelquefois il en existe un grand nombre; dans ce cas elles s'interrompent, en général, toutes sur les mêmes points; cependant on a observé dans quelques cas que toutes les couches ne se moulaient pas les unes sur les autres, et que, tandis que l'une présentait des ponctuations, l'autre pouvait offrir des réticulations ou des anneaux.

6. Les cellules renferment en général des granules, dont la nature peut varier. On y rencontre souvent des grains de fécule (pomme de terre, blé, maïs, etc.), ou bien encore une matière connue sous le nom de *Chlorophyle* (χλωρός vert, φύλλον feuille), qui donne aux plantes leur couleur verte. Très-souvent on rencontre aussi dans les cellules des matières cristallisées, telles que de l'oxalate de chaux, du malate de chaux, etc.

7. **Tissu fibreux.** — Le tissu fibreux, appelé aussi *prosenchyme*, se compose d'utricules allongées en forme de fuseau et atténuées à leurs extrémités (*fig.* 7), désignées pour cette raison sous le nom de *fibres*. Les parois des fibres sont en général épaisses, et leur cavité intérieure est souvent réduite presque à rien. Les couches qui viennent doubler la membrane externe peuvent s'interrompre sur certains points et présenter toutes les particularités que nous venons de noter pour les cellules.


Fig. 7.

8. **Tissu vasculaire.** — Le tissu vasculaire est formé par des tubes cylindriques, en général très-allongés et s'étranglant de distance en distance (*fig.* 8).

Ces rétrécissements sont dus à ce que les vaisseaux sont primitivement constitués par une série d'utricules en forme de tonneaux placés bout à bout et dont les parois disparaissent aux points de contact, de façon à former un tube.

La surface des vaisseaux n'est jamais lisse et unie comme celle de certaines cellules; toujours elle présente soit des ponctuations, soit des réticulations, soit des annulations. D'après ces modifications on a distingué les vaisseaux en *Ponctués* (*fig.* 8), *Rayés* (*fig.* 9), *Annulaires* (*fig.* 10), et *Réticulés*.

Fibres. Vaisseau.

Fig. 8. Fig. 9. Fig. 10. Fig. 11.

9. *Trachées.* — On a réservé le nom de *trachées* (*fig.* 11) à ceux qui sont constitués par une membrane cylindrique et unie, doublée par un fil spiral. Ces vaisseaux sont effilés à leurs extrémités. Le fil spiral qui est enroulé dans leur intérieur s'étend sans interruption d'un bout à l'autre; tantôt les tours de spires se touchent, tantôt ils sont écartés, comme chez le potiron. Quelquefois, au lieu d'un seul fil, il en existe deux ou plusieurs. On peut souvent dérouler la spirale, ainsi formée, en cassant la trachée et en exerçant de légères tractions; cette opération s'exécute facilement sur le sureau. C'est cette propriété qui a fait donner à ces vaisseaux le nom de *trachées déroulables.*

10. Certains vaisseaux présentent à la fois des ponctuations et des raies, ou des raies et des anneaux; d'autres offrent sur une partie de leur longueur la structure annulaire et deviennent ensuite réticulés ou trachéens. Ces particularités ne sont d'ailleurs d'aucune importance.

11. **Vaisseaux laticifères.** — On a désigné sous le nom de *vaisseaux propres* ou laticifères un système de tubes qui, au lieu d'être continus d'un bout à l'autre, communiquent entre eux, s'anastomosent et

forment une sorte de réseau (*fig.* 12). Primitivement ces vaisseaux sont dépourvus de parois; ils sont formés par les lacunes et les interstices qui existent entre les organes élémentaires, mais les sucs qui circulent dans ce système de cavités ne tardent pas à déposer le long de leurs parois une couche spéciale; ils tendent ainsi à se canaliser eux-mêmes.

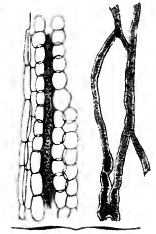


Fig. 12.

12. **Composition chimique des tissus élémentaires.** — Le tissu cellulaire est remarquable par la résistance qu'il oppose aux agents chimiques, de façon qu'on peut facilement le séparer des matières étrangères, et l'obtenir à l'état de pureté. Il est formé essentiellement par de la *cellulose.*

Pour se procurer cette matière on traite les diverses parties d'une plante, d'abord par des lessives de potasse ou de soude, puis par une dissolution d'acide chlorhydrique, de façon à enlever complétement la matière ligneuse et les substances étrangères qui sont mélangées à la cellulose. On lave ensuite le résidu avec de l'eau, puis avec de l'alcool et de l'éther, pour enlever les matières grasses.

La cellulose ainsi obtenue est blanche, diaphane, insoluble dans l'eau, l'alcool et l'éther; les lessives alcalines faibles et les dissolutions d'acides peu concentrés sont sans action sur elle; les acides sulfurique et phosphorique concentrés transforment la cellulose d'abord en *dextrine*, puis en *glucose;* l'acide azotique fumant se combine avec elle pour former un produit inflammable et explosible, analogue au *fulmi-coton* ou coton-poudre.

La cellulose se compose de carbone, d'hydrogène et d'oxygène; son équivalent chimique paraît être $C^{12}H^{10}O^{10}$.

13. La composition de la matière ligneuse est mal connue; on ne sait pas encore si sa composition chimique est toujours identique chez les différents végétaux et dans les diverses parties d'une même plante.

Le ligneux renferme plus de carbone que la cellulose, et l'hydrogène s'y trouve en quantité plus grande que celle qui formerait de l'eau avec l'oxygène.

ORGANES COMPOSÉS.

14. Nous l'avons dit plus haut, les organes élémentaires que nous venons d'étudier, cellules, fibres, vaisseaux, par leur réunion, forment les organes composés qui, à leur tour, constituent le végétal.

La cellule est l'élément primordial de la plante; certains végétaux restent même toujours à cet état; leur embryon ne se compose que d'une utricule et porte le nom de ***spore***. En grandissant il ne fait que s'accroître par l'adjonction de nouvelles cellules. D'autres fois, l'embryon végétal est plus compliqué; il est formé d'un grand nombre d'utricules groupées de façon à y dessiner un ou deux renflements, indices des premières feuilles et connus sous le nom de ***cotylédons***.

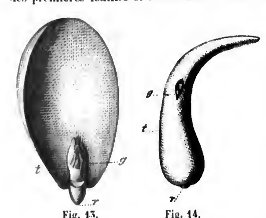


Fig. 13. Fig. 14.

On désigne sous le nom de végétaux ***dicotylédonés*** ceux qui offrent deux ou plusieurs cotylédons (*fig.* 13), et de ***monocotylédonés*** (*fig.* 14) ceux qui n'en présentent qu'un seul. Enfin on réserve le nom d'***acotylédonés*** à ceux dont l'embryon est privé de cotylédon et affecte la forme d'une simple utricule.

Chez les plantes à cotylédons, on remarque, entre ces organes s'il y en a deux, ou à sa base s'il est unique, un petit corps connu sous le nom de ***tigelle t*** (*fig.* 13 et 14) qui, en se développant, doit former la tige. L'extrémité supérieure de la tigelle porte les rudiments des premières feuilles. On appelle ***gemmule g*** le petit bourgeon ainsi constitué. Enfin, à l'opposé de la tigelle, au-dessous des cotylédons, se trouve la ***radicule r***, qui, en se développant, formera la racine.

L'embryon est l'ébauche du végétal et présente déjà une racine, une tige et des feuilles. On peut donc donner à ces parties le nom d'***organes fondamentaux***. Ce sont eux que nous allons étudier maintenant. — Ils présentent tous une enveloppe continue qui s'étend uniformément à leur surface et qui, à raison de cette disposition, a reçu le nom d'épiderme.

15. **Épiderme.** — Cette membrane elle-même se subdivise en deux couches, l'une intérieure, formée d'un ou de plusieurs rangs de cellules, appelée ***épiderme*** proprement dit, l'autre extérieure et continue, nommée ***pellicule épidermique*** ou ***cuticule***.

L'épiderme est toujours mieux développé et plus épais sur les plantes ou sur les parties de la plante les plus directement exposées à l'air. Les feuilles, par exemple, sont enveloppées par une couche épidermique épaisse; les racines, au contraire, ne présentent que des traces de cette

membrane. Les feuilles qui flottent sur l'eau sont pourvues d'épiderme sur la face en contact avec l'air; elles en sont privées du côté qui baigne dans l'eau. Quand elles sont complétement plongées dans ce liquide, elles manquent d'épiderme proprement dit. Il en est de même pour les végétaux *cellulaires* (algues, champignons), et si nous examinons chacune des couches qui composent l'épiderme proprement dit, nous verrons que leur structure diffère beaucoup.

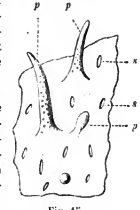


Fig. 15.

16. La couche extérieure ou *cuticule* (*fig.* 15) se présente sous la forme d'une pellicule mince et continue, qui se montre sur toutes les parties du végétal, dont elle reproduit exactement les formes, et se perce vis-à-vis des organes de respiration, pour livrer passage à l'air *s*. La présence de la cuticule est plus générale que celle de l'épiderme proprement dit, car on la constate chez les végétaux aquatiques.

17. L'épiderme proprement dit est formé de cellules juxtaposées et placées sur une ou plusieurs couches (*fig.* 16). Le plus souvent ces utricules présentent une forme prismatique, et les lignes qui les séparent forment un réseau géométrique d'une grande netteté; d'autres fois les cellules sont plus ou moins fluxueuses, comme on peut l'observer sur l'épiderme des feuilles de garance.

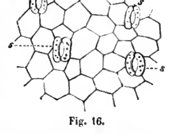


Fig. 16.

La paroi supérieure des cellules épidermiques peut présenter des expansions de diverses formes et constituer des poils, etc. La paroi inférieure est faiblement adhérente aux cellules du parenchyme sous-jacent, de façon que l'on peut facilement arracher la couche épidermique d'un végétal.

18. *Stomates.* — L'épiderme présente, de distance en distance, de petites solutions de continuité, en forme de fentes ou de boutonnières, encadrées par des cellules d'un aspect spécial. C'est par ces ouvertures que la respiration s'opère chez les végétaux, et elles portent le nom de *stomates* (στόμα, bouche); les lèvres de ces boutonnières sont constituées par deux cellules arquées en forme de reins ou de haricots (Voy. *fig.* 16 *s*) qui se touchent par leurs deux extrémités; elles sont remplies de granules verts, et peuvent facilement se gonfler quand le temps est humide, ou se rétracter quand il est sec, de façon à dilater

ou à resserrer l'ouverture du stomate. Ces ouvertures correspondent en général à une *lacune* ou à un petit *méat* ménagé entre les cellules du parenchyme (*fig.* 17 *l*).

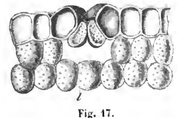


Fig. 17.

Les stomates ne sont pas répartis indifféremment sur toutes les parties de l'épiderme; en très-petit nombre sur les tiges et les branches, ils deviennent plus nombreux sur les parties vertes, mais c'est ***surtout à la face inférieure des feuilles qu'ils s'observent***. Là leur nombre peut devenir énorme. Chez le lilas, on en compte près de **150,000** sur un carré de 25 millimètres.

19. ***Poils.*** — Le poils, comme nous l'avons dit plus haut, résultent de l'allongement d'une cellule épidermique. La forme de ces organes peut varier beaucoup; tantôt ils sont simples (*fig.* 18, A et 15 *p*), tantôt ils se bifurquent (*fig.* 18, B), ou même deviennent rameaux (*fig.* 18, C).

A B C

Fig. 18.

Certains poils sont cloisonnés, c'est-à-dire formés de cellules placées bout à bout. D'autres sont formés de cellules placées côte à côte, et s'étendant en surface; ils sont alors dits ***scarieux***. Quelquefois plusieurs poils, rayonnant d'un centre commun, se réunissent, se soudent en une sorte d'étoile qui se détache facilement. On appelle ***glabre*** toute surface dépourvue de poils, et ***poilue*** celle qui en présente, ***pubescente*** celle qui porte une sorte de duvet, ***velue*** celle dont les poils sont longs et doux. Enfin des expressions techniques telles que ***hirsutus, hispidus, tomentosus***, etc., servent à désigner en botanique l'aspect que donnent à une plante des poils durs et droits, ou crépus, etc..

TIGES

Leurs principales modifications. — Structure de la tige dans les Dicotylédones, les Monocotylédones et les Acotylédones.

20. **Principales modifications des tiges** — La tige est la partie du végétal qui porte les rameaux et les feuilles, et s'élève en général verticalement vers le ciel.

Certains végétaux paraissent, au premier abord, privés de tige; on les désigne sous le nom d'***acaules***, par opposition aux plantes ***caulescentes***,

ou pourvues d'une tige visible. Mais chez les cotylédonés cette particularité n'est qu'apparente et tient à ce que la tige est en général cachée sous la terre.

Les tiges se divisent en *simples* et *rameuses*. — Les premières ne portent pas de branches, comme la tige des palmiers, qui est simplement couronnée d'un bouquet de feuilles. — Les secondes se distinguent par la présence de diverses branches. Dans ce cas, on nomme *axe primaire* ou primordial le tronc principal, en réservant le nom d'*axes secondaires*, *tertiaires*, etc. aux différentes branches, suivant l'ordre d'après lequel elles naissent sur la tige. Chaque axe secondaire peut à son tour jouer le rôle d'axe primaire par rapport aux branches qui s'implantent sur lui, et la division en rameaux peut ainsi être portée extrêmement loin.

21. Les tiges tendent à s'élever vers le ciel, mais elles ne présentent pas toujours une position exactement verticale; elles peuvent être plus ou moins obliques, ou, si elles sont trop faibles pour se maintenir droites, elles cherchent à s'appuyer sur les corps environnants. Quelquefois elles s'enroulent autour d'eux en formant une spirale. On les dit alors *volubiles;* la torsion peut avoir lieu de gauche à droite ou de droite à gauche, mais elle a toujours la même direction pour la même plante.

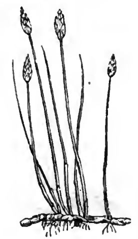
Le volubilis s'enroule de gauche à droite (si on suppose l'observateur placé en face), et le houblon de droite à gauche.

Souvent les tiges ne s'enroulent pas ainsi, elles se soutiennent à l'aide de crampons que l'on appelle vrilles, etc... On donne à ces plantes le nom de *grimpantes*.

D'autres fois la tige cherche un appui sur le sol et s'y attache au moyen de racines qui prennent naissance sur elle, de distance en distance. On dit alors que la tige est *rampante*.

22. Enfin certaines tiges, au lieu de ramper à la surface du sol, croissent entièrement sous terre. Aussi pendant longtemps les a-t-on prises pour des racines. Mais il est facile de se convaincre qu'il n'en est rien, car ces prétendues racines donnent naissance à des feuilles, et nous savons que cette propriété est dévolue seulement aux tiges.

On désigne sous le nom de *rhizomes* les tiges souterraines (*fig.* 19); des fibres radicellaires naissent de ces rhizomes, mais nous savons qu'il en était de même pour les tiges rampantes. En supposant que ces dernières soient enfouies, on aura des


Fig. 19.

rhizomes. De distance en distance il naît des axes secondaires, qui viennent se développer à la surface du sol. L'iris, le blé, l'orge, etc., nous fournissent de bons exemples de rhizomes.

23. Les ***bulbes*** et les ***tubercules*** sont des modifications des tiges souterraines. Pendant longtemps on a rangé ces productions parmi les racines, mais elles n'ont d'autre rapport avec ces dernières que d'être enfouies sous le sol.

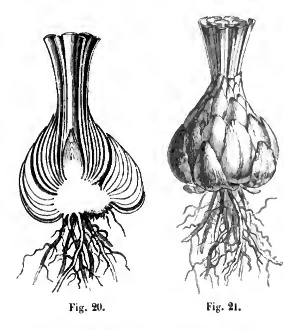


Fig. 20. Fig. 21.

On appelle bulbe un corps arrondi composé 1° d'un plateau plus ou moins circulaire qui porte à sa partie inférieure des racines; 2° de tuniques charnues portées par le plateau et s'emboitant les unes dans les autres ; 3° d'un bourgeon central formé de feuilles ou de fleurs rudimentaires (*fig.* 20 et 21) D'après l'énoncé des parties qui constituent le bulbe, on voit que c'est une plante toute entière, portant ses racines, un axe (le plateau), et des organes appendiculaires (les feuilles). Le bulbe peut être comparé à un rhizome raccourci.

Le bulbe est tantôt ***tronqué***, c'est-à-dire entouré complétement de feuilles modifiées, tantôt ***écailleux***. Dans ce cas, les feuilles se disposent sur plusieurs rangées. — Les oignons peuvent être pris pour exemple de bulbes tronqués, et les lis de bulbes écailleux.



Fig. 22.
Pomme de terre.

On appelle tubercule (*fig.* 22) un corps renflé qui se trouve sous le sol, adhérent au rhizome. — Ce corps résulte de l'épaississement et du raccourcissement d'un axe secondaire qui

devient charnu et se charge de fécule. La pomme de terre, par exemple, n'est qu'un bourgeon modifié par les conditions dans lesquelles il s'est développé. Il suffit, en effet, pour transformer en tubercules les jeunes bourgeons aériens de la pomme de terre, de les entourer de terre. Si l'on jette les yeux sur une pomme de terre, on y voit de petite écailles, traces rudimentaires des feuilles.

Les tubercules que l'on trouve suspendus aux racines du dalhia ne dépendent pas de la tige, ce sont des réservoirs de matière nutritive, appartenant au système radiculaire.

24. La consistance des tiges peut varier beaucoup; tantôt elles sont charnues, molles et chargées de sucs; tantôt elles sont dures et ligneuses. Les premières sont désignées sous le nom de *tiges herbacées*, les secondes sous celui de *tiges ligneuses*.

Les plantes herbacées ne vivent souvent qu'une année, et, à raison de cette particularité, portent le nom de plantes *annuelles;* celles qui vivent deux ans sont appelées *bisannuelles;* enfin on appelle *vivaces* celles qui persistent plusieurs années.

La dimension des tiges est entièrement variable. Chez quelques plantes elles sont à peine de la grosseur d'un fil (*exacum filiforme*); chez d'autres, tels que les boababs, elles peuvent avoir jusqu'à vingt-sept mètres de circonférence, sur une hauteur proportionnée. — On a donné le nom d'*arbres* à celles dont la taille est considérable, et on appelle *arbustes* ou *arbrisseaux* celles qui restent basses et se ramifient près de terre.

25. **Structure des tiges.** — La structure intérieure des tiges varie beaucoup, suivant que l'on s'adresse à un végétal dicotylédoné, monocotylédoné ou acotylédoné. Il est nécessaire de faire une étude à part de chacun de ces groupes.

26. **Structure des tiges des dicotylédonées.** — La tige de ces plantes se compose de deux parties distinctes :

1° L'écorce ou système cortical;

2° Le bois ou système ligneux.

Chacun de ces systèmes se décompose lui-même en plusieurs parties, dont il est facile de constater la présence en coupant en travers une branche d'arbre et en l'examinant au microscope. Dans un rameau d'un an toutes les parties constitutives de la tige y sont représentées; il est donc préférable de faire porter ses observations sur une branche de cet âge, dont les tissus encore tendres permettent d'isoler facilement les éléments constitutifs. Si on examine une branche de l'érable commun (*acer campestre*) on voit au centre une colonne de tissu cellulaire à cellules grandes et gorgées de sucs; cette partie porte le nom de *moelle*. Autour de la moelle se trouvent des faisceaux de fibres et de vaisseaux, appelés pour cette raison *fibro-vasculaires;* la réunion de ces faisceaux est nommée *étui médullaire*, parce qu'ils servent en quelque sorte d'étui à la moelle; entre cha-

cun de ces faisceaux se trouve une couche de tissu cellulaire qui se détache en rayonnant de la moelle. L'étui médullaire est remarquable par la présence de nombreuses trachées. En dehors de ces faisceaux s'en trouvent d'autres constituant une couche ligneuse dépourvue de trachées.

Là s'arrête le système ligneux. Il est séparé du système cortical par une couche cellulaire, puis viennent des faisceaux fibro-vasculaires, en dehors se trouve une ***enveloppe cellulaire*** puis une autre couche de même nature, mais dont les cellules sont brunes et serrées; c'est la ***couche subéreuse***, enfin l'***épiderme*** revêt le tout.

Nous trouvons donc dans le système ligneux : 1° La moelle au centre; 2° l'étui médullaire; 3° les faisceaux fibro-vasculaires du bois; 4° les rayons médullaires qui les séparent.

Dans le système cortical : 1° les faisceaux fibro-vasculaires de l'écorce; 2° l'enveloppe cellulaire; 3° l'enveloppe subéreuse; 4° l'épiderme. Nous allons maintenant passer en revue chacun de ces parties.

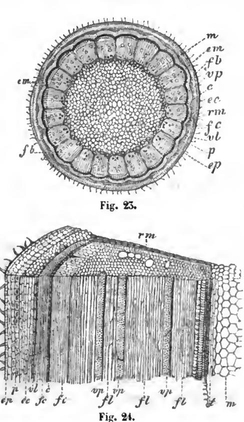


Fig. 23.

Fig. 24.

27. **Système ligneux**. — *Moelle*. — La moelle *m* (*fig.* 23 et 24), qui occupe l'axe de la tige, est, comme nous l'avons dit, composée de cellules, plus grosses au centre qu'à la périphérie. Ces dernières sont gorgées de sucs. — Plus la plante est jeune plus la moelle est volumineuse; peu à peu les cellules se vident, se dessèchent et paraissent s'atrophier. Quelquefois même elles se détruisent, et il se produit au centre de la tige des vides considérables ou même une cavité continue. La tige est alors dite ***fistuleuse***.

28. ***Étui médullaire em***. — L'étui médullaire constitue la partie interne des faisceaux

fibro-vasculaires du bois, c'est dans cette partie que se rencontrent les trachées *t*. Cet étui est en quelque sorte moulé sur la moelle; il conserve pendant très-longtemps une couleur verte et se modifie peu par les progrès de l'âge.

29. *Faisceaux fibro-vasculaires du bois fb.* — Ces faisceaux ressemblent chacun à un coin émoussé, ils forment à la moelle un cercle concentrique et constituent la portion fondamentale du bois; leur tissu n'est pas homogène, si on en observe une tranche on le verra composé de fibres entremêlées de vaisseaux presque toujours réticulés et ponctués ***vp***. Les vaisseaux sont plus nombreux sur le bord interne et les fibres sur le bord externe. La portion centrale du système ligneux est plus dure que la portion extérieure et porte le nom de cœur du bois ou ***duramen***, tandis que l'on désigne l'autre sous le nom d'***aubier***. L'acajou et l'ébène sont fournis par le duramen du bois, le reste de la tige étant peu coloré. Chaque année une nouvelle couche fibro-vasculaire vient s'ajouter à celle qui existe déjà, et comme toujours, les fibres sont disposées en plus grande quantité à la périphérie, cela permet de reconnaitre les couches formées chaque année, et de déduire l'âge du végétal du nombre des couches fibro-vasculaires.

Chez les conifères ou arbres verts, tels que le pin et le sapin, les fibres du bois offrent une apparence particulière (*fig.* 25), leurs parois sont très-épaisses et présentent des ponctuations disposées sur deux séries rectilignes occupant les deux côtés opposés de la fibre et entourées d'une aréole ou enfoncement en forme de verre de montre. Les fibres voisines se juxtaposent par les bords circulaires de ces espèces de godets, et produisent ainsi de petites cavités comme le feraient deux verres de montre appliqués par leurs contours (*fig.* 26), c'est dans ces petits réceptacles que s'accumulent les produits résineux de l'arbre.

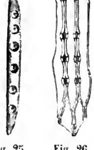


Fig. 25. Fig. 26.

30. *Rayons médullaires.* — Les rayons médullaires *rm* (*fig.* 23 et 24) réunissent la moelle à la couche cellulaire de l'écorce, et séparent les faisceaux fibro-vasculaires. La première année ces rayons sont en même nombre que les faisceaux, plus

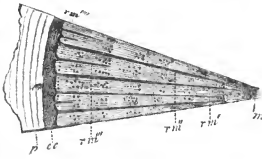


Fig. 27.

tard ils deviennent plus nombreux. Ceux qui existent dès l'origine et qui vont d'un système cellulaire à l'autre portent le nom de *grands rayons rm'* (*fig.* 27). Ceux qui se sont montrés plus tard et qui, partant de l'enveloppe cellulaire de l'écorce ne vont pas jusqu'à la moelle, portent le nom de *petits rayons rm''*.

31. **Système cortical.** — Le système ligneux est séparé du système cortical par une couche mince d'un tissu cellulaire semi-fluide appelée *cambium, c* (*fig.* 23 et 24). Cette partie joue un grand rôle dans les phénomènes d'accroissement des végétaux; c'est à ses dépens que chaque année s'organisent les couches fibro-vasculaires.

32. *Faisceaux fibro-vasculaires de l'écorce ou liber.* — Ces faisceaux, *fc*, sont placés vis-à-vis de ceux du bois. Les parois des fibres qui les constituent deviennent d'une grande épaisseur. Aussi offrent-elles une grande ténacité, que l'on a utilisée pour la fabrication des tissus, des cordes, etc... En effet si on met pourrir des tiges de chanvre ou de lin, toutes les parties se détruisent, à l'exception des fibres du liber, que l'on peut alors préparer pour différents usages. Ces fibres suivent en général une direction rectiligne en formant des couches qui s'empilent les unes sur les autres à la manière des feuillets d'un livre; de là le nom de *liber* que l'on leur a donné; d'autres fois, leur trajet est très-flexueux, et après s'être rencontrées elles s'écartent pour se rencontrer de nouveau, elles forment ainsi un réseau dont les mailles sont remplies par le tissu cellulaire des rayons médullaires.

33. *Enveloppe cellulaire.* — Cette couche *ec* est formée par des cellules contenant dans leur intérieur des grains de *chlorophyle* et qui lui a fait donner le nom de couche verte ou herbacée; c'est dans son épaisseur que se rencontrent les vaisseaux laticifères.

34. *Enveloppe subéreuse.* — Cette enveloppe *p* est ainsi nommée parce qu'elle constitue chez certains chênes (*quercus suber*) le *liége*. Elle se compose de cellules cubiques ou prismatiques, colorées en brun et soudées intimement entre elles. Lorsque les faisceaux fibro-vasculaires augmentent de volume, la couche subéreuse se trouve comprimée, se fendille et se détache par plaques, il en résulte que l'écorce se renouvelle continuellement et n'acquiert jamais une grande épaisseur.

35. *Épiderme.* — L'épiderme *ep* recouvre l'enveloppe subéreuse, mais il n'existe que chez les jeunes plantes, plus tard il se dessèche et se détache.

36. **Accroissement des tiges.** — La première année, comme nous l'avons vu, on ne trouve dans la tige qu'une couche de faisceaux fibro-vasculaires ligneux, et une couche de faisceaux corticaux. L'année suivante, une couche de cambium s'organise entre le bois et l'écorce et constitue des faisceaux nouveaux, qui se séparent pour former une lame nouvelle d'aubier autour des faisceaux ligneux, et une lame de faisceaux de liber en dedans des couches corticales; chaque année il se forme ainsi

une couche ligneuse et une couche corticale, et il est donc facile en les comptant de savoir l'âge d'un arbre.

37. **Greffe.** — Si l'on coupe un jeune rameau d'un arbre et qu'on l'introduise dans un autre arbre d'une espèce voisine, de façon à ce que son extrémité fraîchement coupée soit en contact avec la couche de cambium du second, le jeune rameau pourra se développer et il reproduira l'espèce ou la race de la plante qui a fourni le rameau. On appelle *greffe* ce mode de soudure. La greffe ne réussit qu'entre des plantes du même genre ou de la même famille, par exemple, entre le cerisier et le prunier, le cognassier et le poirier. Il arrive souvent que l'on greffe une race artificielle sur des sujets sauvages, c'est ainsi que l'on reproduit nos plus belles espèces de rosiers en en greffant une branche sur un églantier. On distingue trois sortes de greffes.

La *greffe par approche*. On décortique sur une petite surface deux branches appartenant à deux arbres voisins, on les rapproche et on met en contact les parties dénudées, qui ne tardent pas à se souder. En séparant ensuite l'une des branches de sa souche, elle se développe et se ramifie.

La *greffe en fente* consiste dans l'insertion d'un jeune rameau sur le sommet tronqué d'un végétal ; pour cela on fend la tige, puis on enfonce dans la fente l'extrémité du rameau taillée en biseau, de façon à s'y adapter parfaitement. La branche continue à se développer sans changer de nature, seulement au lieu de puiser sa nourriture dans le sol, elle la puise dans la tige mère.

La *greffe* par *bourgeons* consiste dans la soudure d'un lambeau d'écorce portant des bourgeons sur un végétal préalablement dénudé.

38. **Structure de la tige des monocotylédonées.** — Les plantes monocotylédonées, très-communes dans nos climats, y offrent rarement une taille considérable. Pour trouver de vrais arbres appartenant à ce groupe, il faut descendre plus au midi : là on rencontre des palmiers remarquables par leur tronc élancé ; on peut constater que ce tronc est de la même grosseur de la base au sommet, et qu'il ne porte pas de branches comme le font les plantes dicotylédonées de nos climats. Enfin, il est couronné à son extrémité par une touffe de grandes feuilles.

Si on coupe en travers une de ces tiges, on voit qu'elle se compose de faisceaux fibro-vasculaires et de tissu cellulaire, mais les rapports de ces deux parties ne sont plus les mêmes que pour les dicotylédonées. On ne retrouve plus le cylindre de moelle entouré de faisceaux fibro-vasculaires, entourés eux-mêmes de fibres corticales. Chez les monocotylédonées, les faisceaux fibro-vasculaires sont dispersés sans ordre au milieu du tissu cellulaire ; et sont plus nombreux à la partie périphérique qu'au centre. Le centre, resté presque entièrement cellulaire, représente jusqu'à un certain point la moelle, mais dépourvue d'étui

médullaire. Dans quelques monocotylédonées à croissance très-rapide, ce tissu utriculaire ne peut suivre le bois dans son accroissement et se détruit; c'est ainsi que certaines tiges, celle de roseau, par exemple, se vident à l'intérieur et deviennent fistuleuses. Chez la plupart des graminées, c'est-à-dire chez le blé, l'orge, l'avoine, le seigle, il en est de même. La tige est recouverte d'épiderme qui disparaît bientôt, et il ne reste plus qu'une couche cellulaire qui s'épaissit par l'enveloppe que lui forment les bases persistantes des feuilles. La réunion de ces couches constitue une sorte d'écorce.

39. ***Faisceaux fibro-vasculaires.*** — Si on examine chaque faisceau fibro-vasculaire pris en particulier, on voit qu'il est composé des mêmes éléments que ceux des dicotylédonées.

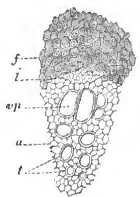


Fig. 28.

En effet, on trouve en dedans des trachées *t* (*fig.* 28) que l'on peut assimiler à l'étui médullaire. Plus en dehors se voient des cellules ponctuées et des fibres mêlées à des vaisseaux rayés ou ponctués *vp*. En dehors de cette partie, comparable au système ligneux, se trouvent des vaisseaux laticifères et des fibres à parois minces enveloppées par des fibres à parois plus épaisses *f*; cette réunion rappelle jusqu'à un certain point le système cortical tel que nous l'avons étudié.

40. ***Marche des faisceaux fibro-vasculaires des monocotylédonées, comparée à celle des dicotylédonées.*** — Chez les tiges dicotylédonées, les faisceaux fibro-vasculaires marchent parallèlement à la surface de la tige, et à eux-mêmes dans toute la longueur du tronc (*fig.* 29); par leur réunion ils forment des faisceaux coniques disposés symétriquement autour d'un axe, la moelle, et des faisceaux plus extérieurs dépendant du système cortical. Quelle que soit la hauteur à laquelle on examine la tige, on retrouve les mêmes parties disposées de même. Chaque année, une couche nouvelle de tissu fibro-vasculaire formée aux dépens du cambium (Voy. parag. 36) vient s'ajouter au système ligneux et au système cortical, mais sans rien changer aux rapports des parties; on donne le nom d'***exogène*** à ces plantes croissant ainsi en dehors.

41. Dans les plantes monocotylédonées, nous venons de voir que les faisceaux fibro-vasculaires étaient disséminés sans ordre au milieu du tissu cellulaire. Leur arrangement varie suivant la hauteur à laquelle on examine la tige. Si nous suivons un faisceau fibro-vasculaire dans toute sa longueur, nous verrons qu'au lieu d'être rectiligne et de suivre un

trajet direct, il est flexueux (*fig.* 30); ainsi un faisceau qui d'une feuille descend dans la tige, se porte d'abord obliquement vers le centre, puis se recourbe en sens opposé pour se rapprocher de plus en plus de la surface; enfin arrivé à l'écorce, il descend verticalement. Dans son trajet il a dû croiser tous les faisceaux fibro-vasculaires placés au-dessous de lui, puisque primitivement il était situé en dehors et qu'il s'est porté plus en dedans pour se reporter ensuite de nouveau à la surface. Le faisceau d'une formation plus récente sera par conséquent situé plus en dehors. Les premiers anatomistes qui avaient suivi la marche de ces faisceaux, avaient supposé qu'une fois arrivés au centre, ils descendaient directement, et avaient désigné sous le nom d'*endogènes* les plantes qui, présentant ce mode d'organisation, auraient eu leurs faisceaux les plus récents au centre, et se seraient par conséquent accrues en dedans. Mais cette expression d'*endogène* est mal appliquée, puisque après être arrivés au centre, les faisceaux vont regagner la périphérie.

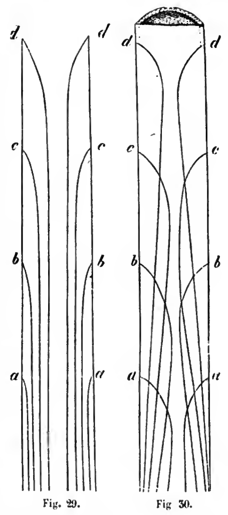


Fig. 29. Fig 30.

Chaque faisceau ne marche pas dans un même plan, dans toute son étendue, comme on pourrait le croire à l'inspection de la figure théorique représentée ici; il s'enfléchit plusieurs fois; sa marche est onduleuse, et sur une coupe verticale, il est impossible de le suivre en entier.

Une fois arrivés sous l'écorce, ces faisceaux fibro-vasculaires s'amoindrissent et deviennent de plus en plus grêles et ténus. Aussi les tiges des monocotylédonés, des palmiers, par exemple, ne sont pas plus grosses

à leur partie inférieure qu'à leur partie supérieure, leur diamètre est à peu près égal à toutes les hauteurs, tandis que chez les plantes dicotylédonées, le tronc s'amincit à mesure qu'il s'élève.

42. **Structure des tiges d'acotylédonées.** — Les plantes acotylédonées sont rarement arborescentes. Chez beaucoup, il ne se produit pas de tiges : tels sont les champignons, les algues ; d'autres, comme les mousses et les lichens, n'ont qu'une tige rudimentaire formée de cellules. Parmi les fougères, quelques-unes atteignent une taille considérable, et dans les pays chauds peuvent devenir arborescentes. Dans ce cas, la tige ressemble par son port à celle des plantes monocotylédonées, c'est-à-dire qu'elle est à peu près cylindrique, et non ramifiée. Si on la coupe en travers, on voit que tout le centre est occupé par du tissu cellulaire, et qu'à la périphérie se trouve un cercle de faisceaux fibro-vasculaires composés de fibres épaisses et de vaisseaux rayés et ponctués. Généralement on ne trouve pas de trachées chez les acotylédonés.

La tige s'accroit, chez ces végétaux, par l'allongement des faisceaux déjà existants, et il ne s'en produit pas de nouveaux. Aussi a-t-on désigné les plantes qui présentent ce mode d'organisation sous le nom d'*acrogènes*.

RACINES

Leurs principales modifications. — Leurs fonctions.

43. **Principales modifications des racines.** — La racine est la portion de la plante qui se dirige en sens contraire de la tige, s'enfonce en général dans la terre, et *ne porte jamais de feuilles*.

Les racines servent à fixer les plantes au sol, et à puiser dans le sein de la terre l'eau et les principes nécessaires à la nutrition des végétaux. Toutes les racines ne s'enfoncent pas dans la terre, celles du lierre s'implantent dans les interstices de l'écorce des arbres et des pierres des murs, celles du gui dans les branches, etc...

Généralement les racines ne sont pas vertes, si ce n'est tout à fait à leur extrémité.

La ligne où commence la racine et où finit la tige porte le nom de *collet*. La racine apparaît toujours simple et unique, mais, en se développant, elle se modifie de diverses manières. L'axe primitif peut s'allonger, grossir et donner naissance à des ramifications secondaires. On la nomme alors racine *simple* et à base unique ; mais quelquefois cet axe primordial s'arrête, s'atrophie, et autour de lui se développe un certain nombre d'autres racines, dont la grosseur est égale et même supérieure à celle de la racine primitive, dont elles remplissent les fonctions. Dans ce cas, on dit que la racine est *composée*. Cette dernière est rarement rameuse.

Les racines *simples* ou *entières* peuvent elles-mêmes se modifier de di-

verses façons. Quand elles prennent un grand développement et ne donnent naissance qu'à des ramifications sans importance, on les appelle *pivotantes;* la carotte (*fig.* 31) que l'on mange n'est autre chose qu'une de ces racines. Il en est de même pour le radis (*fig.* 32).

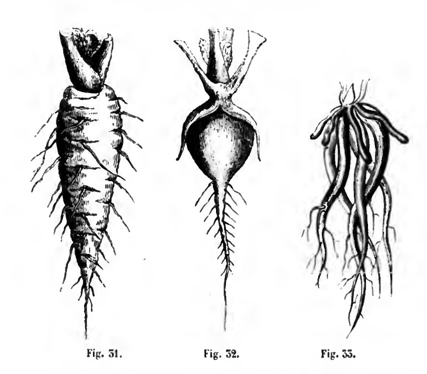


Fig. 31. Fig. 32. Fig. 33.

Les racines composées sont appelées *fasciculées* (*fig.* 33), quand les axes secondaires, dont elles sont formées, sont charnus comme chez l'asphodèle; on désigne sous le nom de *fibreuses* celles dont les parties au lieu d'être renflées sont sèches et cylindriques.

Quelquefois quelques-unes des racines se chargent de matières féculentes et deviennent des sortes de réservoirs de matière nutritive, comme on le voit pour le dalhia. D'autres fois tous les axes se renflent également.

44. Souvent on voit, sous certaines influences, la tige produire des racines, que l'on nomme alors *adventives.*

On a utilisé cette propriété pour multiplier certaines plantes. Au lieu de les semer on se borne à en détacher une jeune branche et à l'enfoncer en terre; bientôt, sous l'influence de l'humidité du sol, il se développe des racines adventives, qui au bout de quelque temps, deviennent assez

fortes pour nourrir non-seulement la branche, mais pour déterminer la formation de bourgeons et de parties nouvelles. Ce mode de multiplication porte le nom de ***bouture***.

Quelquefois ces racines adventives partent de la tige à une certaine hauteur au-dessus du sol. La vanille, par exemple, donne naissance à un grand nombre de racines, que l'on nomme ***racines aériennes***.

Dans le figuier des pagodes, on voit descendre du sommet des branches de longues racines aériennes, qui se dirigent verticalement vers le sol.

45. **Structure des racines**. — La structure des racines n'est pas la même que celle des tiges. Chez les dicotylédonées on n'y rencontre jamais ni moelle ni étui médullaire, le centre est occupé par des faisceaux fibro-vasculaires. L'épiderme de la racine ne présente jamais de stomates. En général il est peu distinct.

Les racines s'accroissent en épaisseur, comme les tiges, par l'addition chaque année d'un faisceau ligneux et d'un faisceau cortical, et elles croissent en longueur par leur extrémité seulement.

46. **Fonctions des racines**. — Les racines servent à pomper dans la terre les liquides nécessaires à la nutrition des tissus, c'est à l'extrémité de leurs ramifications que cette absorption se fait le plus activement. On avait dit que les fibrilles se terminaient par un petit renflement cellulaire nommé ***spongiole***, mais il n'en est rien. Le tissu jeune de l'extrémité des racines est assez perméable pour se laisser traverser par les liquides, c'est par conséquent par les dernières ramifications, par ce que l'on appelle le ***chevelu*** que se fait l'absorption. L'épiderme n'est pas encore formé dans ces parties, et ce sont les cellules elles-mêmes qui sont en contact avec les liquides. Dans leur intérieur se trouvent des sucs épais, en un mot toutes les conditions nécessaires aux phénomènes d'osmose se trouvent réunies. Les racines ne peuvent absorber que des matières en dissolution, et plus la solution est délayée plus l'absorption est rapide.

FEUILLES

Leurs principales modifications. — Leur structure et leurs fonctions. — Influence de ces fonctions sur l'air ambiant. — Étiolement.

47. **Principales modifications des feuilles**. — On désigne sous le nom de feuilles des expansions latérales de la tige, de couleur verte et de forme aplatie.

La feuille est l'organe le plus important du végétal; c'est lui qui, en se modifiant, peut produire une foule d'organes tels que les diverses parties de la fleur, les petites écailles qui entourent les bourgeons, celles qui se trouvent à la base des feuilles, etc...

Les feuilles proprement dites sont les organes de la respiration des plantes;

les feuilles de la fleur ceux de la fructification. Les premières sont ordinairement vertes et bien développées; elles offrent presque toujours un bourgeon à leur aisselle, c'est-à-dire au point où la base de la feuille se sépare de la branche. Les secondes sont de couleurs diverses, moins développées, et jamais on ne voit de bourgeons à leur aisselle.

Les feuilles proprement dites peuvent se développer dans l'air ou dans l'eau. On désigne les premières sous le nom d'***aériennes***, les secondes sous celui de ***submergées***. Nous nous occuperons d'abord des feuilles aériennes. Tantôt la feuille s'attache à la branche par une sorte de queue plus ou moins grêle que l'on nomme ***pétiole p*** (*fig.* 34), tantôt cette partie n'existe pas, et la lame foliaire ou ***limbe l*** s'attache directement à la branche. La feuille est dite ***sessile***.

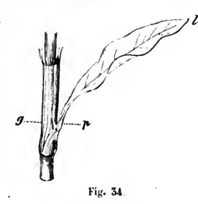


Fig. 34.

Le pétiole peut se dilater à sa base et engainer complétement la tige en formant ce que l'on appelle une ***gaîne g***, ou fournir seulement de chaque côté deux petits appendices ressemblant à de petites feuilles que l'on nomme des stipules ***s*** (*fig.* 35).

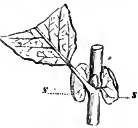
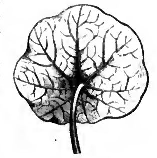


Fig. 35.

48. Le pétiole est formé par des faisceaux fibro-vasculaires qui se détachent du tronc puis s'écartent les uns des autres pour former la charpente solide, les ***nervures*** de la feuille; l'intervalle entre ces nervures est rempli par du tissu cellulaire. Les nervures peuvent se distribuer de diverses manières et donner lieu à des formes différentes de feuilles. Les nervures secondaires peuvent se détacher comme les barbes d'une plume, par rapport à une nervure médiane. La feuille est dite ***penninerviée*** (*fig.* 34). Ce mode de nervation est très-fréquent. Quand les nervures se disposent comme les rayons d'une roue par rapport à un centre formé par le pétiole, on dit que la feuille est ***peltinerviée***, comme celle de la capucine (*fig.* 36). Chez les mauves il y a cinq nervures qui


Fig. 36.

partent du sommet du pétiole, vont en rayonnant, et la feuille ressemble à une patte palmée; aussi l'a-t-on appelée ***palminerviée***. Chez beaucoup de monocotylédonés, l'iris, le seigle, le froment, les nervures restent parallèles entre elles, et la feuille est dite ***rectinerviée***.

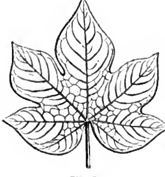


Fig. 37.

Tels sont les principaux modes de distribution des nervures dans la feuille, mais il peut exister des dispositions qui tiennent à la fois de deux systèmes, et dans le détail desquels nous n'entrerons pas.

49. La forme et l'aspect des feuilles tient aussi à la manière dont le parenchyme cellulaire s'étend entre les nervures. Quand il remplit complétement les espaces qui séparent les faisceaux, la feuille est ***entière*** (*fig.* 34 et 36), comme celle du buis, de l'olivier, du lilas, de la belladone, etc., de la renouée.

Le parenchyme peut s'arrêter avant la terminaison des nervures. Il en résulte une série de découpures qui ont reçu le nom de ***dents*** (*fig* 37),



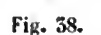


Fig. 38.



Fig. 39.

de ***crénelures*** ou de ***lobes*** (*fig.* 38 et 39), suivant leurs formes et leurs dimensions. Ces différentes modifications sont très-nombreuses et elles n'ont d'ailleurs aucune importance. Dans toutes ces feuilles, que l'on nomme ***simples*** la nervure médiane est toujours accompagnée de parenchyme, qui se continue jusqu'à un certain point le long des nervures secondaires. Mais il arrive souvent que ces dernières nervures sont seules entourées de parenchyme; elles se présentent alors comme autant de petites nervures médianes accompagnées de parenchyme, c'est-à-dire comme autant de petites feuilles complètes situées à droite et à gauche de

a nervure principale qui tient lieu de branche. — Ces feuilles portent le nom de ***composées;*** chaque petite feuille secondaire se nomme ***foliole***, leur petit pétiole prend le nom de *pétiolule*. Ordinairement chacun de ces pétiolules présente un limbe simple à son extrémité, et la feuille est *simplement composée* (*fig.* 40). D'autres fois ces pétiolules se ramifient, et chaque foliole ressemble à son tour à une feuille composée; dans ce cas la feuille entière s'appelle *décomposée* (*fig.* 41).

Fig. 40.

La nervation d'une feuille composée peut affecter toutes les formes dont nous avons déjà parlé; elle peut être pennée, palmée, peltée, etc. La feuille est dans ce cas *composée pennée*, *composée palmée*, etc.

50. **Structure des feuilles.** — Les feuilles sont composées, comme nous l'avons déjà dit, de faisceaux fibro-vasculaires qui forment les nervures, et de tissu cellulaire qui constitue le limbe. Ces faisceaux sont formés des mêmes organes que ceux que l'on trouve dans la tige, dont ils sont une continuation. Les éléments constitutifs sont dans le même ordre, à cette différence près que ce qui était le plus central dans la tige est placé à la partie supérieure dans la feuille; ainsi nous trouvons en dessus des trachées, puis des vaisseaux rayés ou ponctués, des fibres ligneuses; en enfin, dans la moitié inférieure, des vaisseaux laticifères et des fibres corticales.



Fig. 41.

Dans le parenchyme cellulaire du limbe on trouve, au-dessous de l'épiderme, deux couches de cellules, l'une supérieure, l'autre inférieure

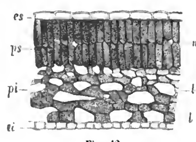


Fig. 42.

(*fig.* 42). La première *ps* est plus dense, formée par deux rangs ou plus de cellules étroites, allongées et arrondies en ovale, placées côte à côte et étroitement unies, laissant parfois entre elles de petits espaces ou méats, perpendiculaires à la surface de l'épiderme. La couche inférieure *pi* est plus lâche, et on y remarque des lacunes *l* plus nombreuses communiquant entre elles, et dans lesquelles débouchent les stomates, qui ne se trouvent qu'à la partie inférieure de la feuille.

La structure des feuilles *submergées* diffère beaucoup de celle des feuilles aériennes. On n'y trouve ni faisceaux fibro-vasculaires, ni épiderme; les cellules dont elles se composent sont, sur deux ou trois rangs, fortement unies entre elles, et on y observe rarement des lacunes. Lorsqu'elles existent, ces cavités sont complétement closes et ne sont en communication ni entre elles ni avec l'extérieur.

51. **Disposition des feuilles sur la tige.** — Le mode d'arrangement des feuilles sur la tige varie suivant les plantes. Elles peuvent être *alternes*, *opposées* ou *verticillées*.

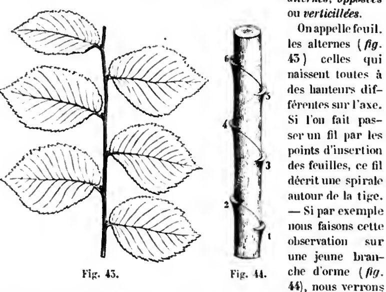


Fig. 43. Fig. 44.

On appelle feuilles alternes (*fig.* 43) celles qui naissent toutes à des hauteurs différentes sur l'axe. Si l'on fait passer un fil par les points d'insertion des feuilles, ce fil décrit une spirale autour de la tige. — Si par exemple nous faisons cette observation sur une jeune branche d'orme (*fig.* 44), nous verrons qu'après le premier tour complet de la spire, la troisième feuille se place juste au-dessus de la première. Au second tour la sixième se place

au-dessus de la quatrième, et ainsi de suite, de telle sorte que toutes les feuilles de l'arbre sont disposées sur deux séries rectilignes et équidistantes à 1/2 circonférence l'une de l'autre, et l'on exprime cet arrangement par la fraction 1/2.

Si c'est la quatrième feuille qui arrive se placer au-dessus de la première, les feuilles seront disposées sur trois séries rectilignes à 1/3 de circonférence, disposition que l'on exprimera par la fraction 1/3. Si c'est la sixième feuille qui se place sur la même ligne que la première, ces appendices seront rangés en cinq séries verticales espacées de 1/5 de circonférence. On trouve ainsi différentes dispositions. On appelle *cycle* le système de feuilles qu'il faut compter pour arriver à la même série verticale que celle qui a servi de point de départ, et il est toujours exprimé par le dénominateur de la fraction, qui indique l'arrangement des feuilles.



Fig. 45.

Les cycles que l'on trouve le plus souvent sont :

1/2, 1/3, 2/5, 3/8, 5/13, 8/21, etc.

Les feuilles opposées sont celles qui sont placées deux à deux, à la même hauteur (*fig.* 45). On les appelle feuilles *verticillées* quand elles sont trois ou plus à la même hauteur, formant une sorte de collerette ou *verticille*. Les feuilles opposées peuvent rentrer dans cette catégorie, car elles sont verticillées deux par deux.

52. **Fonctions des feuilles, influence de ces fonctions sur l'air ambiant.** — Les feuilles servent :

1° A la respiration des végétaux;

2° A l'évaporation de l'eau dont la séve doit se débarrasser.

L'air pénètre par les stomates dans les lacunes et dans les méats qui se trouvent dans les feuilles; il est ainsi mis directement en contact avec les cellules gorgées des sucs propres de la plante, qui peuvent alors respirer.

Les phénomènes de respiration ne se font pas de la même manière, sous l'influence de la lumière ou dans l'obscurité.

Pendant le jour, les plantes absorbent l'acide carbonique contenu en faible proportion dans l'air, fixent le carbone dans leurs tissus et rendent l'oxygène; c'est ainsi que se produisent les matières carbonées qui se rencontrent en si grande quantité dans les végétaux.

Pendant la nuit, les phénomènes sont inverses; l'acide carbonique est exhalé par la plante, qui rend de l'oxygène.

La propriété que les parties vertes des végétaux possèdent de fixer le carbone de l'acide carbonique et de rejeter l'oxygène, leur est communiquée par la lumière. Des feuilles, séparées de la plante, et placées au soleil sous une cloche, produisent encore de l'oxygène au dépens de l'acide carbonique. Les parties d'une plante qui ne présentent pas de matière verte, respirent comme des feuilles placées dans l'obscurité.

La respiration des feuilles submergées se fait au moyen de l'air dissous dans l'eau. Les phénomènes chimiques sont les mêmes que pour les feuilles aériennes.

53. **Étiolement.** — Quand les plantes ne sont pas exposées à une lumière assez vive, elles s'étiolent, se décolorent, blanchissent et se chargent d'une proportion beaucoup plus considérable d'eau qu'à l'état normal; aussi quand les jardiniers veulent enlever à certains végétaux leur saveur par trop amère, ils les couvrent et empêchent la lumière d'arriver jusqu'à eux. Ces phénomènes sont dus à ce que le végétal ne fixe plus le carbone dans ses tissus, qui perdent alors tout leur soutien.

54. **Bractées.** — Entre les feuilles et les fleurs se montrent, comme une sorte de transition, des feuilles modifiées qui portent le nom de *bractées*. A la partie inférieure des axes floraux, les bractées sont isolées, distantes et disposées en spirale. Mais vers l'extrémité de l'axe, elles se rapprochent souvent en un verticelle, qui prend le nom de collerette ou *involucre*.

On dit qu'une bractée est *fertile* quand un pédoncule se développe à son aisselle, dans le cas contraire elle est *stérile*.

Chez plusieurs monocotylédonées, les arums en particulier, les fleurs sont enveloppées par une grande bractée qui, au moment de l'épanouissement, s'entr'ouvre; on donne à cette bractée le nom de *spathe*.

Les bractées minces et scarieuses qui existent à la base de chaque groupe de fleurs, chez les graminées (blé, avoine,) portent le nom de *glumes*.

CIRCULATION DE LA SÈVE.

55. Les fonctions de nutrition s'exercent chez les végétaux aussi bien que chez les animaux, seulement les moyens à l'aide desquels le résultat est obtenu ne sont plus les mêmes. Nous avons vu que l'extrémité des racines était chargée de l'absorption des matières dissoutes dans l'eau et nécessaires à la nutrition; les cellules de l'extrémité des racines, de formation récente, sont gorgées de sucs épais, et les phénomènes d'osmose déterminent l'ascension de l'eau chargée de divers principes qui peuvent être de l'acide carbonique, de l'ammoniaque, de l'acide azotique, du soufre, des alcalis et des sels minéraux. Le liquide formé aux dépens de la dissolution d'une ou de plusieurs de ces matières prend le nom de

sève en pénétrant dans la plante. Du tissu cellulaire des racines, la sève passe dans celui de la tige; par l'intermédiaire des rayons médullaires elle arrive jusqu'à l'écorce; en même temps une certaine quantité pénètre dans les vaisseaux, qui jouent le rôle de tubes capillaires. L'évaporation, qui se fait dans les parties vertes, tend à attirer les liquides et exerce ainsi une sorte de succion vers la partie supérieure. A l'aide de ces trois forces : 1° la force osmotique; 2° l'attraction capillaire; 3° l'aspiration, ou en d'autres termes la pression atmosphérique, le mouvement ascensionnel de la sève devient bientôt général. A mesure qu'elle s'élève, elle dissout les matières élaborées dans les cellules, et devient de plus en plus épaisse. Elle arrive ainsi jusqu'au système cortical et aux feuilles; là elle se trouve en contact avec l'air, dont elle n'est séparée que par les parois des cellules, et subit des modifications profondes. Ensuite, enrichie de matières nouvelles chargée de divers principes, la ***sève descendante*** redescend par le tissu cellulaire, les fibres et les vaisseaux de l'écorce. Il est facile de se convaincre que les propriétés de la sève descendante peuvent être complétement différentes de celles de la sève ascendante; il suffit pour cela de briser certaines tiges, celles de la grande éclaire, par exemple, pour voir s'échapper du système cortical un suc rougeâtre et épais, tandis qu'au centre la sève ascendante est limpide et claire. Chez certains végétaux, tandis que la sève ascendante est incolore et d'une innocuité parfaite, la sève descendante peut être chargée de principes vénéneux et d'une couleur plus ou moins intense.

Pour vérifier le sens dans lequel se fait la circulation de la sève; on peut enlever une bande circulaire d'écorce à un arbre; on verra la sève descendante ou ***élaborée*** suinter par les lèvres supérieures de l'incision. Si on entoure une jeune tige d'un lien fortement serré, on verra un bourrelet épais se former au-dessus de la ligature; si le lien décrit une spirale, le bourrelet suivra toutes ses ondulations, mais lui sera toujours supérieur.

La sève complétement élaborée circule dans les vaisseaux laticifères, elle porte alors le nom de ***latex*** ou suc propre. On désigne par le nom de ***cyclose*** ce mouvement circulatoire dont la direction est de haut en bas.

56. Chez les plantes complétement cellulaires, on observe souvent, dans l'intérieur des cellules, un mouvement des liquides que l'on a appelé ***circulation intracellulaire*** ou ***rotation***. Le courant qui charie de nombreux granules suit le contour des parois de l'utricule, montant d'un côté, descendant de l'autre. Ces phénomènes de rotation ont été d'abord observés chez le chara, puis dans beaucoup d'autres végétaux inférieurs, et enfin jusque dans les poils cloisonnés des dicotylédones.

ORGANES DE LA REPRODUCTION

57. **Divers modes de reproduction**. — Les plantes jouissent de la propriété de se reproduire, c'est-à-dire de donner naissance à des individus semblables à eux-mêmes. Certains organes sont exclusivement destinés à la reproduction de l'espèce.

Cependant quelques parties de la plante peuvent parfois, si les conditions extérieures sont favorables, se développer, quoique détachées de la souche, et produire un individu complet. Nous avons déjà vu que des rameaux, enfoncés en terre, donnaient souvent naissance à des racines, et continuaient à croître. Les jardiniers ont utilisé cette propriété, et ils désignent par le mot de *bouture* ce mode de multiplication.

58. Les branches de fraisier rampent à terre et sur certains points produisent des racines qui s'enfoncent dans le sol et suffisent à nourrir la partie de la plante à laquelle elles se rendent; on peut alors la séparer de la souche et elle continue à vivre. Ce que le fraisier fait naturellement, les jardiniers l'obtiennent artificiellement, en couchant dans la terre les branches et les laissant attachées à la plante mère jusqu'à ce qu'elles aient produit assez de racines pour vivre indépendantes. On appelle *marcotte* ce procédé de multiplication.

Certaines parties peuvent accumuler dans leurs tissus assez de matières nutritives pour vivre et se développer seules; tels sont les tubercules de la pomme de terre, les oignons, les tubercules de la racine de dahlia. Ces différents modes de reproduction *par division* ne sont qu'accessoires; ce sont des accidents. Pour que les plantes se reproduisent, d'une manière normale, elles doivent être fécondées, et l'organe de reproduction est *la fleur*.

FLEUR

59. La fleur est constituée par des feuilles plus ou moins modifiées, qui jamais ne produisent de bourgeons à leur aisselle.

Fig. 46.

Les parties dont une fleur complète se compose sont, de dehors en dedans (*fig.* 46).

1° Le calice, enveloppe ordinairement verte et foliacée;

2° La corolle, formée de pétales et en général colorée;

3° Les étamines;

4° Le pistil.

Toutes ces parties ne sont que des feuilles modifiées; le calice, la corolle et les étamines ressemblent quelquefois extrêmement à de vraies

feuilles, et on voit des transitions si insensibles se faire entre ces deux ordres d'organes qu'il est quelquefois difficile de dire où l'une commence et où l'autre finit.

De même que les feuilles, les folioles florales sont disposées en spirale, seulement cette dernière est tellement raccourcie, que l'on ne peut y reconnaître à première vue l'existence de la spire; c'est pour cette raison que l'on a considéré chaque partie de la fleur comme formant une collerette, une *verticille*. On compte quatre verticilles :

1° Celui des folioles du calice ou sépales;

2° Celui des folioles de la corolle ou pétales;

3° Celui des étamines;

4° Celui des folioles carpellaires ou pistil.

60. Les fleurs *complètes* seules présentent toutes ces parties. Quelques-unes manquent d'un ou de deux de ces verticilles; on les désigne pour cette raison sous le nom de fleurs *incomplètes*.

Chacun des verticilles peut se modifier facilement et prendre l'aspect de l'un des autres; ainsi les étamines se changent souvent en pétales, et réciproquement. Les petites écailles nommées *bractées*, qui accompagnent la fleur, se transforment aussi quelquefois en pétales. Enfin les diverses parties d'une fleur peuvent se changer en feuilles; ce sont ces faits sur lesquels est fondée la théorie des métamorphoses des plantes, que Gœthe exposa avec son génie de poëte.

61. Le pistil est destiné à contenir les graines qui reproduiront le végétal. Aussi lui a-t-on donné le nom d'organe femelle, en le comparant à la femelle qui, chez les animaux, produit les œufs. Par opposition, on a donné aux étamines le nom d'organes mâles. Quand une fleur porte à la fois des étamines et un pistil, elle est dite *hermaphrodite*.

Quelquefois on trouve sur le même pied ou sur des pieds différents des fleurs hermaphrodites, des fleurs mâles (c'est-à-dire à étamines) et des fleurs femelles (c'est-à-dire à pistil). On désigne ces plantes sous le nom de *polygames*.

Les plantes *diclines* sont celles qui ne portent que des fleurs mâles et des fleurs femelles.

Quand les fleurs mâles et les fleurs femelles sont portées sur un même pied, la plante est dite *monoïque* (ex. : ricin).

Elle est dite *dioïque* quand les fleurs femelles et les fleurs mâles se trouvent sur des pieds différents.

INFLORESCENCE

62. On appelle *inflorescence* le mode d'arrangement des fleurs sur l'axe qui les porte. Toutes les plantes n'ont pas la même inflorescence

L'axe de l'inflorescence peut :

1° Être terminé par une fleur;

2° Ne jamais présenter de fleur à son extrémité.

Dans le premier cas, l'inflorescence ne peut continuer qu'au moyen des axes secondaires qui s'arrêtent bientôt terminés eux-mêmes par une fleur; puis des axes tertiaires. Aussi a-t-on désigné ces inflorescences sous le nom de ***définies***.

Dans le second cas, l'axe pourra croître indéfiniment, et les fleurs viendront seulement terminer ou les axes secondaires, ou les axes tertiaires; l'inflorescence sera alors appelée ***indéfinie***.

63. **Inflorescence définie.** — La plus simple de ces inflorescences est celle dans laquelle l'axe porte à son extrémité une fleur unique ***terminale*** et ***solitaire***.

Dans d'autres cas, l'axe primaire se termine par une fleur, mais au-dessous d'elle, à l'aisselle des feuilles, naissent des axes secondaires qui se terminent aussi par une fleur, après avoir produit des feuilles de l'aisselle desquelles partent des axes tertiaires qui portent une fleur à leur extrémité, et ainsi de suite. On appelle ***cimes*** ces inflorescences. Si les feuilles sont opposées, il naîtra toujours deux axes à la fois, et leur nombre, ainsi que celui des fleurs, se doublera à chaque division ; on aura, dans ce cas, une cime bipare (*fig.* 47).



Fig. 47.
Cime bipare.

Si, au lieu d'un verticille de deux feuilles, il en existait un de trois, il se produirait trois axes secondaires, et le nombre des axes irait se triplant chaque fois; on aurait une cime tripare, et ainsi de suite.

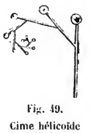
64. Quand les feuilles sont alternes, on observe souvent des ***cimes unipares;*** dans ce cas (*fig.* 48) l'axe principal, se termine par une fleur, mais avant il porte une bractée à l'aisselle de laquelle naît un axe secondaire, qui tend à devenir vertical et rejette l'axe primaire sur le côté pour prendre sa place. Cet axe secondaire est à son tour rejeté de côté par l'axe tertiaire, et ainsi de suite.

Lorsque les fleurs sont disposées sur deux séries placées d'un même côté,




Fig. 48. — Cime unipare.

la cime unipare est appelée *scorpioïde;* lorsque les fleurs sont placées en hélice autour de l'axe, la cime unipare est hélicoïde (*fig.* 48 et 49).


Fig. 49. Cime hélicoïde théorique.

La jusquiame, le myosotis peuvent servir d'exemple à la première de ces dispositions, l'alstrœmeria à la seconde.

Lorsque les axes secondaires ou tertiaires sont aussi longs que l'axe primaire, les fleurs sont toutes à la même hauteur, et on a une cime contractée.

65. **Inflorescence indéfinie.** — Les axes végétaux ne portent pas de fleur à leur extrémité; rien n'arrête leur végétation, et ils peuvent s'allonger indéfiniment. Les axes secondaires peuvent seuls fleurir. Lorsque ces axes sont très-courts et que par conséquent les fleurs sont sessiles, l'inflorescence porte le nom d'*épi* (ex. : le plantain, la verveine, *fig.* 50.)


Fig. 50. Épi.

Le chaton et le spadice sont des modifications de l'épi.

Le *chaton* est un épi formé de fleurs, soit pistilées, soit staminées; il se rencontre chez le saule et le peuplier.

Le *spadice* est un épi de monocotylédonées enveloppé à sa base d'une grande bractée nommée spathe (*fig.* 51).


Fig. 51. — Spathe.



Si les axes secondaires s'allongent un peu et également, de façon à écarter les fleurs de l'axe primaire, l'inflorescence est en *grappe* (ex. : le groseillier, *fig.* 52, la digitale, etc.).



Fig. 52. — Grappe.

Fig. 53. — Corymbe.

66. Si les axes secondaires, au lieu d'être de même longueur, sont inégaux, de telle sorte que toutes les fleurs soient à la même hauteur ces axes secondaires étant d'autant plus courts qu'ils sont plus élevés sur la tige, l'inflorescence est en *corymbe* (ex. : le poirier, le prunier, *fig.* 53, le cerisier de Sainte-Lucie).

On appelle *ombelle* une inflorescence dans laquelle l'axe principal est très-court, et porte à son extrémité élargie un grand nombre d'axes secondaires tous égaux, de façon que les fleurs sont toutes à la même hauteur (*fig.* 54).



Fig. 54. — Ombelle.



Fig. 55. — Capitule.

On appelle *capitule* une inflorescence dans laquelle l'axe principal, élargi à son extrémité, forme une sorte de plateau sur lequel se trouvent groupées des fleurs sessiles (ex. : la scabieuse, *fig.* 55).

67. Lorsque ces capitules sont enveloppés par un ou plusieurs verticilles de bractées, ils prennent le nom de *fleurs composées.* Tantôt toutes les fleurs qui forment le capitule sont semblables entre elles (exemple : artichaut, chardon), tantôt celles du centre diffèrent de celles de la circonférence (ex. : la marguerite, le soleil).

La partie élargie de l'axe primaire ou réceptacle, d'où partent les axes secondaires de l'inflorescence, peut présenter différentes formes; elle peut se creuser en coupe ou en bouteille, dont les parois intérieures sont couvertes de fleurs. Tel est le cas de la figue.

L'épi, le chaton, le corymbe, l'ombelle peuvent être *simples* ou *composés*, suivant qu'ils présentent deux ou bien trois degrés de végétation. Ils sont simples si l'axe primaire ne porte que des axes secondaires terminés par une fleur, et composés si les axes secondaires eux-mêmes portent des axes tertiaires terminés par une fleur.

ENVELOPPES FLORALES.

Calice et Corolle.

68. Nous avons vu que la fleur complète se composait du calice, de la corolle, des étamines et du pistil; ces deux dernières parties sont les plus importantes, ce sont elles qui doivent assurer la conservation de l'espèce. Les étamines fournissent le principe qui doit féconder le pistil dans lequel se développeront les graines. Le calice et la corolle ne sont que des organes de protection, aussi les appelle-t-on *enveloppes florales.* Quelquefois la fleur ne présente qu'une seule de ces parties, dans ce cas c'est ordinairement la corolle qui manque; on donne à ces fleurs le nom d'*apétales.* Chez beaucoup de monocotylédonées, on n'observe aucune différence entre les sépales et les pétales, ainsi, chez le lis, la tulipe, etc. toutes les folioles sont colorées; on a donné, dans ce cas, à l'ensemble de ces pétales et de ces sépales le nom de *périanthe.*

69. **Calice.** — Le calice est l'enveloppe la plus extérieure de la fleur; ses diverses parties portent le nom de *sépales.* Les sépales ne sont que des feuilles modifiées, et de même que les bractées ils représentent tantôt le limbe de la feuille, tantôt son pétiole dilaté, tantôt ses deux stipules réunies. Chez certaines plantes, le camellia, par exemple, il y a tous les passages entre les sépales proprement dits et les bractées qui les entourent; enfin celles-ci passent elles-mêmes insensiblement à la forme des feuilles. Chez la rose on trouve cinq sépales (*fig.* 56). Les deux extérieurs (*fig.* 57) ressemblent à la feuille du rosier, ils ont deux petites folioles sur un pétiole élargi, le troisième sépale (*fig.* 58) ne porte qu'une foliole d'un seul

côté; les deux autres sépales (*fig.* 59) sont entiers, c'est-à-dire qu'ils ne présentent pas de folioles.

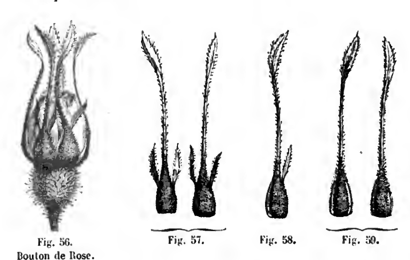


Fig. 56. Bouton de Rose.

Fig. 57.

Fig. 58.

Fig. 59.

Ordinairement le calice est vert, il peut cependant se colorer de diverses manières et se rapprocher ainsi de la corolle. Il devient rouge chez le fuchsia et le grenadier, orange dans la capucine, etc.

Les sépales sont ordinairement entiers; on y observe rarement de découpures, et leur nervation ne consiste que dans quelques nervures qui partent de la base et vont gagner le sommet, en restant toutes à peu près parallèles (*fig.* 60). Quelquefois cependant un seul ou plusieurs sépales se prolongent à la base de façon à former une sorte de tube, connu sous le nom d'*éperon* (ex. : la capucine, la balsamine, *fig.* 61). Quelquefois un sépale s'allonge et s'élargit de façon à recouvrir la fleur comme d'un casque (ex. : l'aconit, *fig.* 62). Chez certaines plantes, les sépales ressemblent à de petits poils, ils forment une petite touffe nommée *aigrette*. Plusieurs familles de plantes, les valérianées par exemple, montrent tous les passages entre

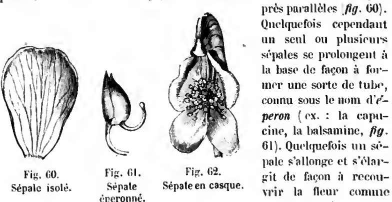


Fig. 60. Sépale isolé.

Fig. 61. Sépale éperonné.

Fig. 62. Sépale en casque.

la forme ordinaire du calice et l'aigrette. Cette dernière peut être ***simple***, ou ***dentelée*** ou ***plumeuse***.

70. Le calice est tantôt ***régulier*** tantôt ***irrégulier :*** il est régulier quand il peut se partager dans sa longueur en deux moitiés symétriques ; il est irrégulier quand ses folioles présentent une forme ou des dimensions différentes ou qu'elles ne sont point disposées avec symétrie. Une diagonale ne peut le séparer en deux moitiés symétriques.

L'irrégularité peut tenir au développement plus rapide de l'un des sépales, ou à la soudure de ces parties. Souvent le calice présente une apparence ***bilabiée***, due à ce que les sépales se sont soudés de façon à former deux lèvres. Chez les labiées, la lèvre supérieure a trois folioles et l'inférieure deux ; chez les légumineuses, c'est le contraire : la lèvre supérieure a deux folioles et l'inférieure trois.

71. Le nombre des sépales qui composent le calice peut varier beaucoup.

Il peut y en avoir deux opposés l'un à l'autre, il peut y en avoir quatre disposés en croix, formant ainsi deux verticilles de deux sépales chacun. Enfin le plus souvent, chez les plantes dicotylédonées, le calice se compose de cinq sépales, disposés alors en spirale et formant un ***cycle*** (Voy. paragr. 61) ; seulement, comme l'axe est très-raccourci, ils paraissent s'insérer à la même hauteur. Toutes les fois que les sépales sont en nombre impair, ils sont disposés en spirale.

Le calice peut être ***monosépale*** ou ***polysépale*** : il est monosépale quand les sépales sont tous soudés de façon à ne former qu'une pièce unique ; il est polysépale quand chaque sépale est distinct. On remarque dans le calice monosépale le tube, la gorge et le limbe ; le tube est la partie cylindrique formée par la base des folioles, la gorge est l'orifice du tube, le limbe est la partie supérieure qui se prolonge en lame.

72. Le calice peut se conserver jusqu'à la maturation du fruit. Il est alors dit ***persistant*** (ex. : la violette, la bourrache, l'œillet, etc.).

Chez la plupart des fleurs, il tombe en même temps que la corolle après la fécondation, on le dit ***caduc*** (ex. : la giroflée, le bouton d'or). Enfin, chez quelques plantes, il ne paraît que dans le bouton et tombe au moment de l'épanouissement de la fleur. Les botanistes ont désigné ces calices sous le nom de ***fugaces*** ou passagers (ex. : le pavot).

73. **Corolle.** — La corolle est la seconde enveloppe de la fleur. Elle est constituée par les ***pétales***, qui, de même que les sépales, ne sont que des feuilles modifiées et presque toujours colorées. De même que chez les feuilles, on trouve dans les pétales une partie élargie, le ***limbe***, et une autre plus rétrécie, l'***onglet*** (*fig.* 63). Le limbe peut s'insérer directement sur le réceptacle. Il peut présenter un bord entier ou découpé de diverses manières. — Quelquefois les pétales se prolongent à leur base en un tube nommé ***éperon*** (ex. : ancolie, *fig* 64). Quelquefois ils s'étalent

et se recourbent en forme de casque, ou bien se disposent en bateau et constituent une carène, comme chez le polygala (*fig.* 65).

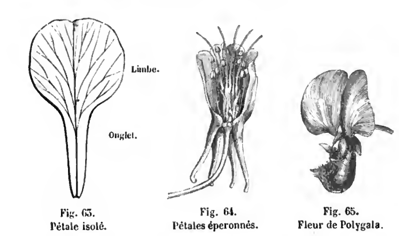


Fig. 63.
Pétale isolé.

Fig. 64.
Pétales éperonnés.

Fig. 65.
Fleur de Polygala.

74. La corolle est régulière ou irrégulière. Sa régularité ou son irrégularité dépendent des mêmes causes que pour le calice (Voy. paragr. 70).

Le nombre des pétales peut varier. Chez les dicotylédonés, il est ordinairement de cinq, disposés en spirale; chez les monocotylédonés, le nombre le plus commun est trois. Ce nombre peut s'augmenter beaucoup, car, par la culture, il est facile de transformer les étamines en pétales.



Fig. 66.
Corolle cruciforme.

On appelle *cruciforme* la corolle présentant quatre pétales en croix (ex. : giroflée, *fig.* 66), *rosacée*, celle dont les pétales, au nombre de trois ou cinq, sont étalés en rosace (ex. : rose benoite, *fig.* 67), et *caryophyllée*, celle dont les pétales, au nombre de cinq, sont portés par de longs onglets (ex. : œillet, silène, *fig.* 68). Les corolles *papillonacées* sont composées de cinq pétales irréguliers (*fig.* 69). L'un est ordinairement postérieur, c'est l'*étendard;* deux sont latéraux, ce sont les *ailes;* deux sont antérieurs et forment la *carène :* le pois, le haricot, l'acacia portent des corolles ainsi disposées.

75. Les pétales peuvent être parfaitement distincts et indépendants l'un de l'autre, dans ce cas la corolle est dite *polypétale* (*fig.* 66); ou ils sont soudés dans une plus ou moins grande partie de leur longueur, la

corolle est alors dite ***monopétale*** ou ***gamopétale*** (*fig.* 70). Dans ce cas, de même que dans le calice, elle offre un ***tube***, une ***gorge*** et un ***limbe***. — Ordinairement, quand les pétales sont soudés en un tube, les étamines se soudent elles-mêmes en tube.

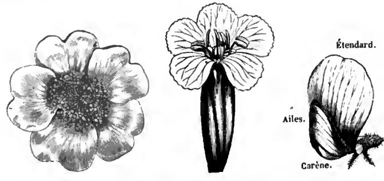


Fig. 67. Corolle rosacée.

Fig. 68. Corolle caryophyllée.

Fig. 69. Corolle papillonacée.

La corolle monopétale régulière peut prendre diverses formes.

Elle est ***tubuleuse***, si le limbe est cylindrique comme le tube (ex. : la grande consoude); elle est ***infundibuliforme*** ou en entonnoir, si le limbe se dilate graduellement à partir de la gorge (ex. : le tabac, *fig.* 140).

Elle est ***campanulée*** ou en cloche, s'il n'existe pas de tube et que la corolle s'élargisse régulièrement de la base au sommet (ex. : le liseron, *fig.* 70).

Elle est ***hypocratériforme*** si le tube est cylindrique et le limbe étalé en forme de soucoupe (ex. : la pervenche, le lilas).

Elle est ***rosacée,*** si le tube est très-court et le limbe évasé en soucoupe (ex.: bourrache, pomme de terre, rose benoite, *fig.* 67).

Elle est ***urcéolée*** ou en grelot si le limbe est rudimentaire et si le tube renflé en urne se rétrécit à son orifice (ex. : l'arbousier).



Fig. 70. Corolle gamopétale.

La corolle monopétale irrégulière peut être :

Ligulée, quand le limbe cylindrique, dans sa partie inférieure, se fend d'un côté et se rejette de l'autre sous la forme d'une languette (ex. : le pissenlit, *fig.* 71).

Labiée, si le limbe se partage en deux lèvres, dont la supérieure est formée ordinairement par l'union de deux pétales et l'inférieure de trois (ex. : la sauge, *fig.* 72 et 139).



Fig. 71. Corolle ligulée. Fig. 72. Corolle labiée. Fig. 73. Corolle personnée.

Personnée, quand la corolle est bilabiée et que les deux lèvres se touchent par l'intermédiaire d'un renflement de la lèvre inférieure (ex. : la gueule-de-loup, *fig.* 73).

Les pétales se détachent et tombent en général peu de temps après l'épanouissement. — Chez quelques plantes, ils persistent. On applique à ces différentes espèces de corolles les mêmes noms qu'au calice, et on dit que la corolle est ***persistante, caduque, fugace.***

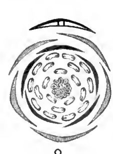


Fig. 74. Diagramme d'une fleur.

76. Quand il n'y a qu'un seul verticille de sépales et un seul de pétales, ces derniers alternent avec les sépales, c'est-à-dire qu'ils sont placés entre les points d'insertion de ceux-ci. Au contraire, les étamines sont placées vis-à-vis des sépales et alternent avec les pétales, les pistils alternent avec les étamines et sont superposés aux pétales. Ainsi, si l'on fait une coupe horizontale, un ***diagramme*** (*fig.* 74) d'une fleur de fraisier, on verra en dedans de la bractée, le calice; puis, alternant avec lui, les cinq pétales de la corolle, puis trois verticilles d'étamines alternant avec les pétales et avec les pistils.

ORGANES DE LA FÉCONDATION.

77. **Étamines**. — Nous avons vu que le troisième verticille de la fleur portait le nom d'androcé et était constitué par les *étamines*, organes fondamentaux de la plante, puisqu'ils servent à la fécondation. Les étamines ne sont que des feuilles modifiées. On peut s'en convaincre en examinant une fleur de nénuphar, où l'on voit les pétales se transformer insensiblement en étamines (*fig.* 75). Nous avons d'ailleurs dit que les étamines pouvaient se transformer en pétales; or, nous savons que les pétales ne sont que des feuilles modifiées, donc il en est de même pour les étamines.



Fig. 75.
Pétales et étamines de Nénuphar.

78. *Filet*. — On distingue deux parties dans l'étamine (*fig.* 76), le *filet* et l'*anthère*. Le filet a la forme d'une petite colonne, c'est le représentant du pétiole de la feuille, de l'onglet du pétale; il sert de support à l'anthère. Tantôt il est très-court et l'anthère est presque sessile; tantôt il est très-long, comme chez le fuchsia.

Ordinairement le filet est *dressé;* quelquefois cependant il est *infléchi.*

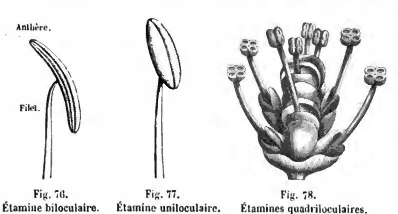


Fig. 76. Étamine biloculaire. Fig. 77. Étamine uniloculaire. Fig. 78. Étamines quadriloculaires.

79. *Anthère*. — L'anthère, qui termine l'étamine, est supportée par le filet; elle est formée d'une petite masse creusée de *loges* ordinairement au nombre de deux. Dans ce cas l'anthère est biloculaire (*fig.* 76). Quelque-

fois l'anthère est *uniloculaire* (*fig.* 77), soit qu'une des loges ne se soit pas développée, soit qu'il n'y en ait réellement qu'une seule; enfin, chez quelques plantes, telles que les lauriers, les anthères sont *quadriloculaires* (*fig.* 78).

L'anthère peut être attachée directement au filet, dont elle paraît le prolongement; dans ce cas elle est *adnée* (*fig.* 79), ou bien les loges de l'anthère sont unies entre elles par un prolongement du filet, qui a reçu le nom de *connectif*. Quelquefois le connectif ne suit plus la direction du filet; il s'étend à droite et à gauche perpendiculairement au filet. Ainsi, chez la sauge (*fig.* 80), il forme deux filets latéraux terminés chacun par une loge, dont l'une est atrophiée *ls*, l'autre fertile *lf*.

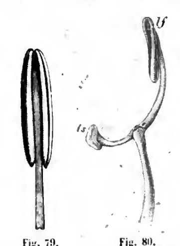


Fig. 79. Étamine adnée. Fig. 80. Étamine de Sauge.

Quand l'anthère paraît en équilibre sur l'extrémité du filet, elle est dite *oscillante* (*fig.* 76).

80. ***Déhiscence des anthères.*** — Les loges de l'anthère sont dans le principe complètement closes et contiennent dans leur intérieur une poussière particulière nommée *pollen*, sur laquelle nous reviendrons. Au moment de la fécondation, elles s'ouvrent, soit par un trou, soit par une fente qui se forme dans leurs parois. On désigne sous le nom de *déhiscence* le mode d'ouverture des loges. Tantôt la déhiscence est longitudinale (*fig.* 76 et 77), tantôt horizontale (*fig.* 81).



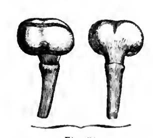


Fig. 81. Étamines à déhiscence horizontale.



Fig. 82. Déhiscence par des pores.

Fig. 83.

Quand la déhiscence se fait par un trou ou *pore*, ce dernier peut être placé au sommet de chaque loge (*fig.* 82) ou à sa base. — Quelquefois il

y a vers le milieu ou au sommet de chaque loge une sorte de valvule qui, à l'époque de la fécondation, se soulève comme un couvercle et reste attaché par un de ses bords, comme sur une charnière (ex. : les berbéris, les monimia, *fig.* 83).

Lorsque la fente ou le trou de déhiscence regarde le centre de la fleur, l'anthère est ***introrse***. C'est le cas le plus ordinaire; quand il regarde l'extérieur, l'anthère est ***extrorse***.

Tantôt les étamines sont ***libres*** et indépendantes les unes des autres, tantôt elles sont soudées entre elles, soit par leurs filets, soit par leurs anthères (ex. : la campanule, *fig.* 84). On appelle ***monodelphes*** celles qui sont unies par leurs filets. Si elles sont soudées en deux ou plusieurs phalanges, on dit qu'elles sont ***diadelphes*** (*fig.* 85), ***polyadelphes***.

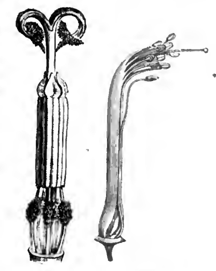


Fig. 84. Fig. 85.
Étamines diadelphes.

81. ***Structure de l'anthère.*** — Les parois des loges de l'anthère sont formées de deux couches de cellules. La plus extérieure, de nature épidermique, porte souvent des stomates. L'intérieure se compose en général de plusieurs rangées de cellules ***fibreuses***. Son épaisseur diminue à mesure qu'elle se rapproche de la ligne de déhiscence; là elle devient nulle. — Ces cellules sont ordinairement des cellules spirales ou annulaires, dont la membrane extérieure ne tarde pas à disparaître, de sorte qu'à l'époque de la maturité de l'anthère il ne reste plus que les fils ou les petites bandes, disposées soit en spirale, soit en anneau; sous l'influence de conditions hygrométriques différentes, elles se tordent, se courbent plus ou moins, et déterminent des tractions dans le tissu de l'anthère, qui ne tarde pas à se rompre sur le point où il présente le moins de solidité, c'est-à-dire sur la ligne de déhiscence.

82. **Pollen.** — Nous avons dit que les loges de l'anthère contenaient une poussière très-fine qui sort au moment de la déhiscence et est expulsée par les contractions des cellules fibreuses. Cette poussière est connue sous le nom de ***pollen***. Les grains de pollen se forment dans l'intérieur de l'anthère, qui primitivement est rempli d'un tissu mucilagineux, lequel bientôt s'organise en ***cellules mères*** du pollen. Les granules qu'elles contiennent se concentrent en une petite masse, qui se divise bientôt en quatre

parties par des cloisons. Chaque noyau se revêt d'une tunique spéciale, qui elle-même se double d'une autre tunique plus dure et plus épaisse. Les cloisons se détruisent et les noyaux, qui ne sont autre chose que les grains de pollen, sont libres dans leur petite loge. Cette loge disparaît elle-même, et les granules intérieures se trouvent contenues seulement dans la cavité de l'anthère.

Les grains polliniques ne sont pas toujours complétement indépendants. Quelquefois ils sont unis entre eux par une matière glutineuse élastique qui se distend facilement, comme chez les orchis (*fig.* 86)



Fig. 86. Masse pollinique d'Orchis.

Cette matière peut se durcir tellement qu'il devient impossible de séparer les grains. — Chez les asclépiadées, chaque anthère contient deux masses polliniques.

Le cas le plus général est celui où les grains du pollen sont libres. Leurs formes sont très-variables, tantôt ils sont sphériques (*fig.* 87), tantôt ellipsoïdes, tantôt

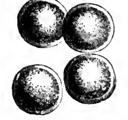


Fig. 87.

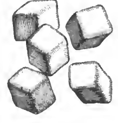


Fig. 88.

cubiques (*fig.* 88), tantôt ils présentent des sortes de facettes. C'est la membrane externe qui donne au grain du pollen sa forme. En effet, elle est dure et ferme, tantôt lisse, tantôt granulée, tantôt hérissée de petites aspérités.

83. Chaque grain de pollen renferme une matière fluide dans laquelle sont suspendus un grand nombre de granules. Ce contenu porte le nom de ***fovilla***, et paraît jouer un rôle important dans les phénomènes de fécondation. C'est à cette époque seulement qu'il s'échappe du grain de pollen. La ***déhiscence*** du pollen peut s'expliquer facilement. La membrane extérieure ou ***exhyménine*** est rigide, tandis que l'intérieure ou ***endhyménine*** est beaucoup plus extensible. Quand cette dernière est exposée à l'humidité, elle se gonfle et rompt l'exhyménine, qui l'entoure comme une coque.

Quelquefois la déhiscence se fait indifféremment sur un point quelconque du grain, mais presque toujours elle a lieu par de petites ouver-

tures spéciales, comme nous l'avons vu pour les anthères. Ce sont des ***pores*** pratiqués dans la membrane externe; leur nombre peut varier suivant les plantes. Quelquefois ce sont des ***plis***, que l'on observe à la surface du grain : chez les monocotylédones, on ne trouve ordinairement qu'un seul pli; chez les dicotylédones, on en voit souvent trois, quelquefois une douzaine ou plus.

Si l'on place un grain de pollen dans l'eau, bientôt, par l'effet de l'endosmose, il se gonflera; la membrane extérieure, si elle est homogène, ne tardera pas à se rompre. Mais, si elle présente des amincissements sur certains points, ces points céderont plus facilement et commenceront par se soulever sous l'effort de la membrane interne; bientôt elle se rompra et l'endhyménine s'allongera par ces petites ouvertures, sous forme d'ampoule allongée, puis de boyau (*fig.* 89); qui finira bientôt par céder, et la fovilla sera expulsée au dehors (*fig.* 90). On désigne cette dilatation pyriforme de la membrane interne sous le nom de ***tube*** ou ***boyau pollinique***. Les phénomènes qui ont lieu lorsque l'on met un grain de pollen dans l'eau se passent de même quand le grain est placé sur l'extrémité humide du pistil.



Fig. 89.

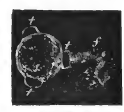


Fig. 90.

ORGANES FEMELLES DE LA REPRODUCTION.

PISTIL.

84. **Origine du pistil.** — Le pistil est le verticille le plus intérieur de la fleur, il est situé au centre et entouré par les étamines, les pétales et les sépales. Il est formé par la réunion des ***feuilles carpellaires*** ou ***carpelles***. On donne aussi à ce verticille intérieur le nom de ***gynécée***.

Les carpelles ne sont que des feuilles modifiées, comme il est facile de s'en convaincre en examinant certaines fleurs, celles du cerisier double par exemple, dont le centre est occupé par de petites feuilles un peu pliées terminées par un prolongement qui semble continuer la nervure moyenne (*fig.* 91). Chez le cerisier ordinaire, à la place de ces petites feuilles



Fig. 91.



Fig. 92.
Pistil de Cerisier.

on trouve un petit corps renflé à sa base, surmonté d'un prolongement dilaté au sommet; le renflement basilaire est creux et contient un autre corps plus petit (*fig.* 92). On appelle *ovaire* la partie renflée *o*; *ovule g*, le petit corps qui y est contenu; *style t*, le prolongement; et *stigmate s*, la dilatation terminale; entre ce pistil complétement formé et les feuilles centrales du cerisier double il n'y a que peu de différence; pour transformer ces dernières en un carpelle il suffit que les deux bords du limbe se rapprochent et se soudent, de façon à constituer une loge où se développerait l'ovule.

85. **Structure du pistil.** — Si maintenant nous examinons la structure des diverses parties du carpelle, nous devons trouver l'ovaire constitué par un parenchyme parcouru par des faisceaux fibro-vasculaires, comme le limbe d'une feuille, dont il est l'analogue. L'épiderme extérieur, qui correspond à celui de la face inférieure de la feuille, est percé par de nombreux stomates, tandis que l'épiderme intérieur n'en présente pas.

Le style se compose de faisceaux fibro-vasculaires et de cellules, son axe est occupé par un canal étroit qui s'étend du stigmate à la loge de l'ovaire. Ce canal est rempli par un tissu cellulaire, lâche et mucilagineux, qui porte le nom de *tissu conducteur*.

Le stigmate n'est que l'épanouissement de ce tissu conducteur, il est hérissé de cellules saillantes en forme de papilles, sa surface est toujours humide et visqueuse, et sert à retenir les grains de pollen qui y sont tombés.


Fig. 93.

86. **Ovaire.** — Il peut n'y avoir au centre de la fleur qu'un seul carpelle; s'il y en a plusieurs, ils peuvent être indépendants les uns des autres, ou soudés entre eux, soit en partie, soit en totalité. Quelquefois la soudure se fait par les ovaires, d'autres fois par les stigmates comme chez les apocynées et les asclépiadées; ou par le haut des styles (*fig.* 93), ou par toute la longueur du style, comme chez les fraxinelles.

Lorsque plusieurs carpelles sont soudés, il semble n'exister qu'un seul pistil au centre de la fleur, mais si on le coupe en travers, on remarque qu'à l'intérieur il se compose de plusieurs loges, correspondant à chaque carpelle primitif. Chez la scrofulaire, par exemple

(*fig.* 94), on reconnaît de cette manière que le pistil résulte de l'accolement de deux feuilles carpellaires.

Un ovaire ***uniloculaire*** est donc formé en général par un seul carpelle, un ovaire ***biloculaire*** par deux, un ovaire ***triloculaire*** par trois, et ainsi de suite.

Les carpelles peuvent se souder avec le calice, supprimant ainsi la partie inférieure des verticilles intermédiaires; dans ce cas on dit que le calice et l'ovaire sont ***adhérents;*** la position du pistil peut dépendre de la forme du réceptacle : si celui-ci se termine en cône, le pistil en occupe le sommet et les autres verticilles sont placés au-dessous; si, au contraire, il a la forme d'une coupe, le pistil en occupe le fond, et les autres verticilles sont situés au-dessus.


Fig. 94.

Lorsque les feuilles carpellaires se soudent pour former un pistil pluriloculaire, leurs faces latérales s'aplatissent par la pression qu'elles exercent les unes sur les autres, de manière à former des cloisons qui s'étendent de la périphérie au centre. Chacune de ces cloisons appartient par moitié à chacun des ovaires contigus; quelquefois les cloisons ne persistent pas, elles se détruisent, de sorte que l'ovaire devient uniloculaire, et que pour déterminer le nombre de carpelles qu'a formé le pistil il faut examiner de jeunes plantes. Le nombre des styles et celui des stigmates correspond en général au nombre des carpelles, il peut donc guider aussi dans cette recherche, on peut aussi se servir du mode de distribution des ovules. L'ovaire peut être également uniloculaire lorsque les carpelles se soudent par les bords sans se recourber vers l'axe.

87. **Placenta**. — On nomme *placenta* la partie renflée de la cavité de l'ovaire, sur laquelle s'attachent les ovules.

La disposition des placentas, ce que l'on nomme la ***placentation***, peut varier, on en connaît trois modifications :

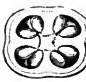
1° La ***placentation axile;***

2° La ***placentation pariétale;***

3° La ***placentation centrale.***

Ces deux derniers modes n'existent que dans les ovaires uniloculaires, le premier ne se trouve que dans les ovaires pluriloculaires. En effet, lorsque plusieurs feuilles carpellaires se soudent entre elles, tous leurs bords peuvent se rencontrer au centre; or, comme les ovules s'attachent toujours aux bords des carpelles, les placentas se trouvent alors rangés au-


Fig. 95.


Fig. 96.

tour de l'axe en nombre égal à celui des loges, et forment ce que l'on nomme la placentation axile; il y a deux rangées d'ovules, puisque chaque bord en porte (*fig.* 95 et 96).

Si les feuilles carpellaires se sont seulement soudées par leurs bords, au lieu de se plier, le pistil est uniloculaire, et les bords, au lieu de converger au centre, s'écartent l'un de l'autre; les placentas sont alors placés sur les parois de la loge. On a alors une placentation pariétale (ex. : la petite centaurée, *fig.* 97), la violette (*fig.* 98 et 99), etc.). Dans ce cas

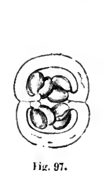


Fig. 97.



Fig. 98.



Fig. 99.

chaque placenta est encore double, mais appartient par moitié à deux carpelles, au lieu d'être formé aux dépens des deux bords de la même feuille carpellaire.

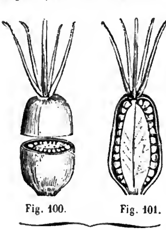


Fig. 100. Fig. 101.

Placentation centrale.

Lorsqu'un ovaire pluriloculaire, formé par la soudure de plusieurs carpelles, devient uniloculaire par suite de la disparition des cloisons, il restera néanmoins au centre un axe isolé formé par les placentas, la placentation sera dite centrale (*fig.* 100 et 101). Ce mode peut se rencontrer chez les ovaires formés primitivement d'un seul carpelle (ex. : la primevère).

88. **Style.** — Le nombre des styles est toujours égal à celui des carpelles, mais quelquefois plusieurs styles se soudent de façon à paraitre n'en constituer qu'un seul.

Le style d'un carpelle unique peut rester simple, ou se bifurquer, quelquefois même il peut devenir rameux, comme chez certaines euphorbiacées. Lorsque le pistil est formé de plusieurs carpelles, les styles se

soudent souvent entre eux, mais dans la plupart des cas leur partie supérieure est libre. La mauve ordinaire nous offre un bon exemple de cette disposition (*fig.* 102).

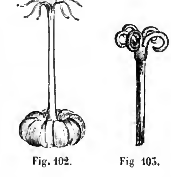


Fig. 102. Fig 103.

89. **Stigmate.** — Le stigmate peut être sessile, c'est-à-dire que le style peut manquer. Il peut être situé soit à l'extrémité, soit sur un des côtés de ce support. Les divisions du stigmate correspondent en général au nombre des loges qui constituent l'ovaire. Le stigmate à cinq divisions des campanules indique que l'ovaire est quinquéfide (*fig.* 103). Nous avons déjà vu que chez les asclépiades, bien que les carpelles soient libres, les stigmates sont soudés.

90. **Ovule.** — Les ovules sont des petits corps attachés aux placentas et contenus dans l'intérieur de l'ovaire. Ce sont eux qui, en se développant, forment la ***graine***, et sont destinés à reproduire la plante.

L'ovule s'attache quelquefois directement au placenta; dans ce cas, il est ***sessile***, ou bien il est suspendu par une sorte de petit filet nommé ***funicule f*** (*fig.* 104).



Fig. 104.

Le point par lequel l'ovule s'unit au placenta ou au funicule porte le nom de ***hile***.

Les ovules (*fig.* 105) se composent d'un mamelon central, le ***nucelle n***, enveloppé par un sac membraneux ordinairement double; la tunique extérieure porte le nom de ***primine te***, l'intérieure celui de ***secondine ti***; ce sac est percé à son sommet d'une petite ouverture appelée ***micropyle***.

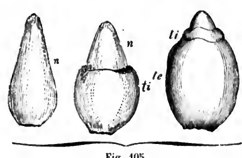


Fig. 105.

Le nucelle en se développant se creuse d'une cavité appelée ***cavité embryonnaire***, au sommet de laquelle se trouvera suspendu, par un filet nommé ***suspenseur***, le rudiment de la plante nouvelle, l'***embryon***. Cette

cavité se revêt d'une membrane propre appelée *sac embryonnaire*. Chez quelques végétaux le développement de l'ovule s'arrête là et l'embryon seul s'accroît; mais, en général, à la base du nucelle il se développe une membrane, la secondine, qui tend à l'envelopper; la primine se montre ensuite, le sommet du nucelle apparaît quelque temps encore, mais finit par être caché, et il ne reste plus que le micropyle (*fig.* 106 *my*), composé alors de deux ouvertures : l'une correspondant au tégument externe et appelée *exostome;* l'autre au tégument interne, appelée *endostome*.

91. Le funicule s'attache sur la primine. C'est sur cette membrane que se trouve le hile, qui la traverse ainsi que la secondine, pour s'épanouir à la base du nucelle, où il forme une épaisseur nommée *chalaze*.

Le funicule ne s'attache pas toujours au même point sur les ovules, il en résulte de grandes différences dans les rapports qui existent entre le hile et le micropyle.

Lorsque le hile est à l'une des extrémités de l'ovule et le micropyle à l'autre, l'ovule est dit *orthotrope* (ex. : la rhubarbe, *fig.* 106).



Fig. 106.
Ovule orthotrope.



Fig. 107.
Ovule anatrope.



Fig. 108.
Ovule campulitrope.

Lorsque le hile est placé à côté du micropyle, l'ovule est dit *anatrope* (*fig.* 107); c'est le cas le plus ordinaire. Cette disposition est due à ce que le sommet de l'ovule a exécuté une demi-révolution qui a rapproché le micropyle du hile.

Lorsque l'ovule est courbé en forme de rein ou de haricot et que le hile est situé au milieu de la dépression, il est dit *campulitrope* (*fig.* 108). Ces ovules se rencontrent chez les légumineuses : haricot, pois, etc...

Les ovules peuvent être *dressés* ou *renversés* dans l'intérieur de l'ovaire; eur nombre est très-variable; chez quelques plantes il n'y en a qu'un seul, chez d'autres il y en a un nombre considérable.

92. **Fécondation.** — Pour que l'ovule se transforme en graine il faut que la plante soit fécondée; cet acte important est dévolu au pollen; et pour l'accomplir, cette poussière doit être mise en contact avec le pistil. Chez la plupart des plantes, les étamines et le pistil sont portés sur la même fleur, et le pollen peut tomber naturellement sur le stigmate; mais il est des fleurs

qui ne portent que des étamines, tandis que sur le même pied d'autres fleurs sont seulement pistillées. Quelquefois il n'existe sur un même pied que des fleurs à étamines, et sur un autre que des fleurs à pistils; tel est le cas des dattiers et des pistachiers. Pour que la fécondation ait lieu, il faut que les grains de pollen, transportés soit par le vent, soit par les insectes, tombent sur le stigmate. On peut, dans ce cas, en recouvrant les fleurs pistillées d'une gaze légère, empêcher la fécondation.

Lorsque les graines de pollen arrivent sur le stigmate, celui-ci est enduit d'une liqueur visqueuse qui les retient d'abord, puis agit sur eux en les faisant gonfler; les boyaux polliniques s'allongent et se frayent un passage dans le style, à travers les cellules du *tissu conducteur* (*fig.* 109). Ils arrivent ainsi jusque dans l'ovaire et suivent toujours ce même tissu, qui se continue jusqu'auprès des ovules par les placentas; là, ils rencontrent l'ovule, ils s'engagent dans le micropyle et arrivent au contact du sac embryonnaire; ils se rompent alors, la fovilla s'échappe et se trouve en rapport avec la vésicule embryonnaire, qui, à partir de ce moment, devient apte à se développer et à se transformer en une graine.



Fig. 109.
Trajet du boyau pollinique.

93. **Production de chaleur et de lumière.** — Au moment de la fécondation on remarque que chez certaines plantes leur température propre s'accroît d'une façon très-notable, et devient quelquefois sensible au toucher. On a remarqué qu'en même temps la combustion respiratoire devient beaucoup plus active, qu'une quantité considérable d'oxygène est absorbée et vient brûler le carbone des tissus pour se transformer en acide carbonique. C'est surtout chez les aroïdées que l'on a constaté ce développement de chaleur.

A l'époque de la floraison, on a remarqué que certaines plantes produisaient des lueurs phosphorescentes. Ces phénomènes s'observent principalement chez les fleurs jaunes ou dorées, telles que la capucine, le soleil, la rose d'Inde. Les rhizomorpha nous présentent un des plus curieux exemples de ces phénomènes lumineux, car ils cessent dans les gaz irrespirables et deviennent beaucoup plus vifs dans l'oxygène.

94. **Mouvements dans les plantes.** — A l'époque de l'émission du pollen on voit chez certaines plantes les étamines exécuter divers mouvements, se pencher chacune à leur tour sur le pistil pour y déposer leur poussière fécondante. Mais, à d'autres époques, et pendant toute la vie de certains végétaux, on observe dans les feuilles des mouvements très-apparents. Pendant la nuit les folioles des acacias se baissent verticalement; celles des trèfles et des fèves se relèvent; les folioles de l'*amorpha fructicosa* s'étendent horizontalement le matin et à mesure que le jour avance,

elles se relèvent pour s'abaisser quand la nuit approche, et deviennent tout à fait pendantes quand l'obscurité est complète.

Dans le baguenaudier, au contraire, les folioles se relèvent à partir du coucher du soleil.

Les folioles de la sensitive (*mimosa pudica*) se rapprochent le soir, et s'appliquent les unes contre les autres, en dirigeant leur pointe vers le sommet de la feuille.

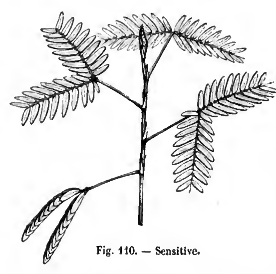


Fig. 110. — Sensitive.

Ces phénomènes ont été désignés sous le nom de *sommeil* des plantes; ils peuvent cependant avoir lieu sous certaines influences étrangères: il suffit par exemple de toucher ou d'imprimer une légère secousse à une branche de sensitive pour voir aussitôt les folioles se rapprocher et s'appliquer les unes contre les autres (*fig.* 110).

95. Certaines feuilles exécutent des mouvements continuels, chez l'*hedysarum gyrans*, petite plante dont les feuilles sont composées de trois folioles, l'une médiane, plus grande, et deux petites latérales, on remarque que la grande foliole s'incline lentement tantôt à droite, tantôt à gauche, tandis que les petites tournent sur elles-mêmes par de petits mouvements saccadés.

La *dionée-attrape-mouche* porte des feuilles hérissées de petits piquants; lorsqu'une mouche vient se poser sur elles les deux côtés se rapprochent vivement, la nervure médiaire jouant le rôle de charnière, et emprisonnent l'insecte.

Enfin il n'est personne qui n'ait entendu parler de la *valisneria spiralis;* cette plante aquatique porte des fleurs staminées et des fleurs pistillées sur des pieds différents; au moment de la fécondation la fleur staminée se détache et flotte sur l'eau, au même moment le pédoncule de la fleur à pistil, qui était contourné en spirale et complétement immergé, se déroule, s'allonge, porte cette fleur à la surface de l'eau, puis, quand la fécondation a eu lieu, il se roule une seconde fois et attire sous les eaux le fruit qui va mûrir.

Ces phénomènes de mouvement paraissent dus à une cause mécanique, et rien n'autorise à croire qu'ils se fassent sous l'empire d'une volonté ou d'une sensibilité quelconque.

96. L'épanouissement des fleurs est soumis, dans quelques espèces, à l'influence de la lumière et a lieu à des heures fixes. Les boutons du liseron des haies s'ouvrent à trois heures du matin, ceux du salsifis à quatre heures, ceux du pavot à tige nue à cinq heures, ceux de la belle de jour à six heures; ceux du lis des eaux à sept heures; ceux du mouron rouge à huit heures. On peut ainsi, en réunissant des plantes qui s'épanouissent à heure fixe, former une *horloge de flore*.

FRUIT ET GRAINE

Développement et structure des fruits, de la graine et des parties qui la composent. — Embryon. — Sa structure. — Changements chimiques pendant la germination. — Développement de l'embryon et structure de la jeune plante.

FRUIT.

97. **Différentes parties du fruit.** — Quand la fleur a été fécondée, les pétales tombent, ainsi que les étamines; le style et le stigmate disparaissent; quelquefois le calice persiste, devient adhérent à l'ovaire, l'ovule se développe et prend le nom de graine, l'ovaire subit aussi des changements notables, et c'est l'ensemble de la graine et du pistil ainsi modifié qui forme le *fruit*.

Les plantes qui n'ont qu'un ovaire ne présentent qu'un seul fruit; au contraire, celles qui portent plusieurs carpelles peuvent offrir plusieurs fruits. Le fruit se compose des mêmes parties que l'on trouve dans l'ovaire; or l'ovaire n'est autre chose qu'une feuille modifiée. Nous trouvons donc dans le fruit les parties de la feuille, c'est-à-dire un épiderme intérieur, un épiderme extérieur, et entre eux un parenchyme cellulaire. Dans le fruit, chacune de ces parties porte un nom spécial. La membrane externe forme l'*épicarpe* (*fig.* 111 *e*), la couche du parenchyme le *mésocarpe m* et la membrane interne l'*endocarpe n*.



Fig. 111.
Coupe d'un fruit.

98. L'épicarpe, le mésocarpe et l'endocarpe forment par leur réunion le *péricarpe*. La consistance du péricarpe varie beaucoup, suivant les fruits. Quelquefois il est sec et membraneux, d'autrefois charnu, ou bien une ou plusieurs de ses parties peuvent être sèches et les autres charnues.

L'épicarpe, qui forme la peau, la *pelure* des fruits, tels que la pèche, etc., est ordinairement fin et conserve l'aspect qu'il avait dans le pistil.

Dans la cerise, la prune, l'abricot, il en est ainsi. Dans la poire et la pomme, l'épicarpe est doublé par l'enveloppe calicinale. Souvent il s'épaissit par l'addition de cellules nouvelles. Il peut se hérisser d'épines, comme dans la pomme épineuse (*datura stramonium*), le marron d'Inde (*æsculus hippocastanum*).

Le mésocarpe, appelé aussi *sarcocarpe*, prend souvent un développement considérable et forme la chair de nos fruits comestibles. tels que pommes, poires, cerises, abricots, prunes, pêches, etc... Dans le melon, le mésocarpe est rougeâtre et succulent à l'intérieur, vert et coriace à l'extérieur. Chez certaines plantes, le mésocarpe est sec et dur; dans l'amandier et le noyer, il constitue l'enveloppe verte et coriace qui protége l'amande et la noix; dans l'orange, il constitue l'enveloppe que l'on rejette, la partie comestible étant formée par un tissu cellulaire qui se développe dans les loges de l'ovaire.

L'endocarpe est ordinairement mince et transparent; il tapisse à cet état les parois des loges du fruit. C'est ce que l'on voit sur les prunes, les cerises, etc. Chez la pomme et la poire, il s'encroûte de matière ligneuse et forme l'enveloppe coriace des pepins. Enfin, chez la noix et l'amande, son épaisseur est considérable et il forme la coque que l'on est obligé de briser pour arriver à la graine; dans l'orange il constitue l'enveloppe transparente des quartiers.

99. Les carpelles qui constituaient le pistil peuvent tous se développer, ou quelques-uns peuvent avorter. C'est ce qui arrive en général pour ceux qui n'ont pas été fécondés. Quelquefois cet avortement se produit normalement. Ainsi, dans des ovaires d'abord formés de plusieurs loges, il arrive souvent qu'une seule se développe. Le fruit de la châtaigne se compose primitivement de trois loges; une seule des graines se développe, pousse la cloison contre la paroi de la loge et remplit seule sa cavité. Quelquefois, au lieu de perdre leurs cloisons, certains ovaires en acquièrent de nouvelles, formées par des replis de la paroi, qui s'avancent jusqu'à ce qu'ils rencontrent ceux du côté opposé. Les fruits de la casse, dont l'ovaire est simple, offrent un grand nombre de ces *fausses cloisons*.

100. **Déhiscence du fruit.** — Lorsque la graine est *mûre*, elle doit être expulsée au dehors et se développer séparément. Quelquefois les fruits se pourrissent et se détruisent. Dans ce cas ils sont *indéhiscents;* d'autres fois ils s'ouvrent, suivant des lignes déterminées, et laissent échapper la graine. Ces fruits sont *déhiscents*. — Dans ce cas on observe sur les parois du fruit des *valves*, ordinairement en nombre égal aux loges, quelquefois cependant en nombre double. — Le fruit du haricot s'ouvre en deux valves, qui portent chacune un rang de graines sur un de leurs bords (*fig.* 112).

Quand les carpelles, soudés à leur partie inférieure, sont indépendants vers leur sommet, il arrive souvent que la partie libre s'ouvre seule.



Fig. 112.
Fruit s'ouvrant en 2 valves.



Fig. 113. Fig. 114.



Fig. 115.

La déhiscence peut se faire par un trou ou pore situé soit au sommet, comme chez le pavot (*fig.* 113) et la gueule-de-loup (*fig.* 114), soit vers la base, comme dans la campanule raiponce (*fig.* 115). La déhiscence se fait quelquefois transversalement, de façon que le fruit se sépare en deux parties, dont l'inférieure représente une boîte et la supérieure le couvercle (ex. : le plantain et la jusquiame).

Le plus ordinairement, la déhiscence est complète et les valves se séparent de trois manières différentes, que l'on a désignées sous le nom de déhiscence septicide, loculicide et septifrage.



Fig. 116.
Fruit de la Digitale.

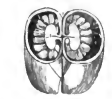
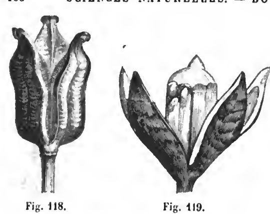


Fig. 117
Coupe du fruit de la Digitale.

La ***déhiscence septicide*** se fait sur les lignes de réunion des cloisons avec le péricarpe; elles forment alors les côtes des valves (ex. : la digitale, *fig* 116 et 117).

La déhiscence ***loculicide*** se fait par des fentes longitudinales sur le milieu des feuilles carpellaires, par le point que l'on désigne sous le nom de suture dorsale et qui correspond à la nervure médiane de la feuille


Fig. 118. Fig. 119.

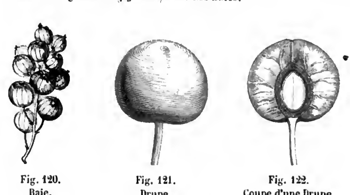
modifiée. Chaque valve est alors formée de deux demi-carpelles, comme on le voit chez le lilas, la tulipe (*fig.* 118), l'iris.

Dans la déhiscence *septifrage*, les cloisons cèdent le long de leur bord externe et se séparent ainsi en valves (*fig.* 119).

101. **Différentes espèces de fruits.** — Les fruits dont les téguments sont secs et membraneux sont à peu près les seuls qui soient déhiscents; les fruits charnus et moux ne le sont pas, ainsi que ceux dont le tissu est ligneux.

102. ***Fruits charnus indéhiscents.*** — Parmi les fruits charnus, on distingue les ***baies*** et les ***drupes***.

Les baies sont des fruits dont le péricarpe est complétement pulpeux. Le raisin et la groseille (*fig.* 120) sont des baies.


Fig. 120. Baie.
Fig. 121. Drupe.
Fig. 122. Coupe d'une Drupe.

Les drupes sont des fruits dont le mésocarpe est très-épais, comme dans la pêche, l'abricot, la cerise (*fig.* 121 et 122). Au milieu du fruit se trouvent un seul noyau, comme dans les plantes que nous venons de nommer, ou plusieurs, comme dans la nèfle.

Parmi les fruits secs, la plupart sont déhiscents; cependant quelques-uns ne le sont pas. Ces derniers ont ordinairement une seule loge et une seule graine.

103. ***Fruits secs indéhiscents.*** — Les principales espèces de fruits secs indéhiscents sont :

1° Le ***caryopse.*** Dans ce fruit, le péricarpe est soudé aux téguments de la graine, à la suite du développement extraordinaire de celle-ci (ex. : le blé, l'orge, l'avoine, le seigle, *fig.* 123) ;

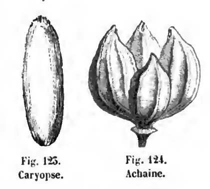


Fig. 123. Caryopse.

Fig. 124. Achaine.

2° L'***achaine*** diffère du précédent en ce que la graine n'adhère au péricarpe que par un point d'attache (ex. : la chicorée, le pissenlit, le thalictrum, *fig.* 124) ;

3° La ***samare*** est un achaine, présentant une lame membraneuse, qui s'étend en forme d'ailes. Dans l'érable deux samares s'accolent ensemble.

104. ***Fruits secs déhiscents.*** — Les fruits secs déhiscents sont en général désignés sous le nom de fruits capsulaires ou capsules. La gousse, la follicule, la silique, la pyxide sont des fruits secs déhiscents.

La ***gousse*** est un fruit allongé qui contient de nombreuses graines attachées longitudinalement d'un seul côté de la suture ventrale, et s'ouvre en deux valves, comme le haricot (*fig.* 112).



Fig. 125. Follicule.



Fig. 126. Silique.

La ***follicule*** est une feuille repliée sur elle-même, dont la déhiscence se fait par la suture ventrale correspondant à l'accolement des deux bords de la feuille ; le pied d'alouette (*fig.* 125), l'ancolie, etc., peuvent servir d'exemple de cette espèce de fruit.

La ***silique*** ressemble par sa forme extérieure à une gousse, mais la déhiscence se fait par deux valves qui s'écartent, les placentas et les graines restant en place (ex. : la giroflée, *fig.* 126).

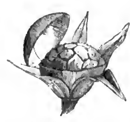


Fig. 127. — Pyxide.

La ***pyxide*** est un fruit qui s'ouvre en deux parties par une fente transversale comme une boîte à savonnette ; il y en a d'uniloculaires comme chez le mouron rouge (*fig.* 127) et de pluriloculaires.



Fig. 128. — Cône.

105. Fruits composés. — Lorsque les fruits de plusieurs fleurs sont très-rapprochés, ils peuvent se confondre et former un fruit *composé* qui au premier abord ressemble à un fruit unique.

Dans les arbres verts, pins, sapins, cyprès, la *pomme*, le *cône* (*fig.* 128), n'est qu'un fruit composé, car il provient de fleurs différentes.

Il en est de même pour la mûre. Chaque fruit en particulier est un achaine à calice persistant et succulent, mais par leur développement ils se soudent (*fig.* 129).



Fig. 129. Mûre.

Les fruits composés ne doivent pas être confondus avec les fruits multiples provenant d'une seule fleur et résultant du développement d'un grand nombre de carpelles. La framboise (*fig.* 130) est composée d'une foule de petites drupes qui proviennent toutes de la même fleur. A leur base on voit les traces du calice, ce qui ne se voit jamais chez les fruits composés.

Nous avons déjà eu l'occasion de dire que le calice pouvait persister et même se développer avec le fruit et faire corps avec lui.

Dans la belle-de-nuit, le calice forme au fruit une enveloppe dure et noire. Dans la pomme, le calice est également adhérent.

Fig. 130. Framboise.

GRAINE.

106. Structure de la graine. — La graine résulte du développement de l'ovule

On distingue dans la graine une partie essentielle, l'*embryon*, et des parties accessoires, les enveloppes et l'*albumen* (*fig.* 131 et 132).

107. *Albumen*. — L'albumen ou *p.risperme* n'est autre chose qu'un magasin de matières nutritives destinées à subvenir aux besoins de l'embryon. Quelquefois ce corps peut manquer. Dans ce cas, ce sont les cotylédons qui remplissent son rôle; ils deviennent alors épais et charnus, comme dans le haricot



Fig. 131. Graine.



Fig. 132. Coupe de graine.

L'albumen renferme tantôt de la fécule, comme dans les graminées; tantôt des matières oléagineuses, comme dans le ricin.

Dans le café, il acquiert la consistance de la corne; dans le blé, il est très-volumineux, par rapport à l'embryon; dans le frêne, il est à peu près égal au volume de l'embryon.

108. ***Embryon.*** — L'embryon, qui plus tard deviendra la petite plante, constitue quelquefois à lui seul la graine; dans l'amande, on le trouve immédiatement sous les téguments. Quand l'albumen existe, les rapports de ces deux parties peuvent varier beaucoup. Tantôt l'embryon est appliqué sur un point de ce corps (ex. : le blé), tantôt il est enroulé de façon à l'entourer plus ou moins complétement (ex. : nielle des blés, *fig.* 133). Enfin, il peut être renfermé dans l'intérieur de l'albumen comme chez le ricin.

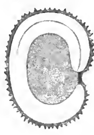


Fig. 133.

Nous avons déjà dit (Voy. paragr. 14) que dans l'embryon on distinguait trois parties essentielles :

1° La ***radicule;***

2° La ***gemmule;***

3° Les ***cotylédons.***

La radicule (*fig.* 134 *r*), est d'abord toujours simple; plus tard, en se développant, elle tend à se ramifier en même temps qu'elle s'enfonce dans la terre.

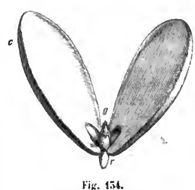


Fig. 134.
Embryon d'Amandier.

La gemmule *g* s'allonge en sens inverse de la radicule, avec laquelle elle se continue; elle ressemble d'abord à un petit mamelon nommé ***tigelle***, surmonté bientôt de petites lobes qui se développeront en feuilles.

Les cotylédons *c* sont les premières feuilles de l'embryon; dans l'amandier, le haricot, ils sont épais, charnus et gorgés de matières féculentes destinées à la nourriture de la jeune plante.

Chez les plantes dicotylédonées, les deux cotylédons naissent à la même hauteur sur la tige (*fig.* 134); il peut y en avoir un nombre plus considérable.

Chez les monocotylédonées, le cotylédon est unique et s'insère tout autour de la tigelle, comme une feuille engainante, de façon à recouvrir la gemmule comme d'une coiffe. Sur un de ses côtés on aperçoit un petit pertuis qui doit livrer passage à la gemmule (*fig.* 14).

109. Les graines, une fois mûres, sont expulsées du fruit, soit que celui-ci s'ouvre naturellement, soit qu'il se détruise; quelquefois elles sont surmontées d'une aigrette qui donne prise au vent et permet leur dissémination (ex. : chardon); elles peuvent aussi porter des espèces d'ailes qui jouent le même rôle (ex. : pin, sapin).

110. **Germination.** — Quoi qu'il en soit, après l'émission de la graine, si les conditions au milieu desquelles elle se trouve sont favorables, conditions que lui fournit ordinairement la terre quand elle y est enfoncée à une petite profondeur, l'embryon se développe, la graine *germe.*

Si, au contraire, les circonstances extérieures ne favorisent pas ce développement, les graines peuvent se conserver très-longtemps sans s'altérer; on peut faire germer des haricots conservés pendant des années; on a semé et on a vu se développer des graines enfermées par les anciens Gaulois dans les tombeaux; on a fait la même expérience sur du blé trouvé à côté des momies dans les pyramides d'Égypte.

111. Pour qu'une graine puisse germer, elle doit être soumise à l'action de certaines influences dont les principales sont l'*humidité*, la *chaleur* et l'*air.*

L'humidité agit en ramollissant les téguments de la graine, en gonflant les parties essentielles, et en déterminant des phénomènes chimiques sur lesquels nous reviendrons.

Une chaleur modérée est indispensable; au-dessous de 0° on ne voit se développer aucune graine, au-dessus de 50° il en est de même; cependant on connaît quelques végétaux inférieurs qui vivent et se reproduisent dans des eaux thermales (à Dax, par exemple) dont la température est très-élevée.

L'air agit surtout par son oxygène.

112. Lorsque la graine est pourvue d'un albumen, celui-ci se ramollit, sa nature chimique se modifie, et l'embryon se nourrit à l'aide des matières qui viennent d'être ainsi préparées, de façon qu'à mesure que l'albumen diminue, l'embryon grandit. S'il n'y a pas d'albumen et que les cotylédons soient chargés de fournir à la jeune plante les matières nutritives nécessaires à son développement (haricot, pois), la germination se fait plus rapidement que dans le cas précédent.

L'embryon, en se développant, brise les téguments de la graine et se montre au dehors. C'est la radicule qui paraît la première, puis la tigelle s'allonge; ses petits lobes latéraux se développent au-dessus des cotylédons entr'ouverts, qui ne tardent pas à se flétrir et à disparaître, et bientôt la plante ne tire plus sa nourriture que d'elle-même par l'intermédiaire de ses racines.

113. **Changements chimiques de la graine pendant la germination.** — Nous avons déjà dit que l'albumen, quand il existe,

ou les cotylédons, s'il manque, sont ordinairement chargés de matières féculentes; dans le blé, dans le haricot, dans le pois, il est facile, à l'aide de la teinture d'iode, de mettre en évidence la présence de la fécule; mais si on répète l'expérience quand la jeune plante se développe, la coloration bleue caractéristique ne se montre plus, et au microscope on n'aperçoit plus de grains de fécule dans les cellules de l'albumen (chez le blé) ou des cotylédons (chez le haricot). Ce résultat est dû à ce que la fécule, pour devenir absorbable, s'est transformée en dextrine, puis en glucose. Cette transformation est due à la présence dans la graine d'un principe quaternaire particulier, la ***diastase;*** analogue quant à ses propriétés, à la ***ptyaline*** de la salive, et qui, par une action catalytique, jouit de la faculté d'agir sur les fécules et de les transformer en sucre.

114. On a utilisé dans l'industrie cette propriété, et on emploie le sucre produit ainsi aux dépens de la fécule des graines, pour la fabrication de certaines liqueurs alcooliques et en particulier de la bière. Pour arriver à ce résultat, on fait d'abord germer de l'orge, puis on la fait tremper dans de l'eau chaude; la diastase agit alors avec une grande activité sur la fécule, qui se convertit en dextrine, puis en glucose. On soumet alors la matière à la fermentation; il se dégage de l'acide carbonique et il se produit de l'alcool; on aromatise la liqueur avec des feuilles de houblon et on la clarifie.

Pour fabriquer de l'alcool de grains, on emploie les mêmes procédés, puis on distille le liquide fermenté dans des appareils spéciaux.

STRUCTURE COMPARÉE ET CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES PLANTES DICOTYLÉDONES, MONOCOTYLÉDONES ET ACOTYLÉDONES.

115. Nous avons déjà vu qu'en se basant sur la structure de l'embryon, les botanistes avaient divisé le règne végétal en trois grandes sections:

Les ***dicotylédones;***

Les ***monocotylédones;***

Les ***acotylédones.***

Chez les premiers, l'embryon présente au moins deux cotylédons; chez les seconds il n'en offre qu'un; chez les troisièmes, l'embryon est homogène, sans distinction de parties, sans cotylédons. Ces sortes d'embryons portent aussi le nom de ***spores*** (*fig.* 135).



Fig. 135. Spore.

Bien que dans le courant de cet ouvrage nous ayons, à propos de chaque organe, indiqué les caractères qui distinguaient ces grands groupes, nous allons les résumer rapidement ici.

116. ***Plantes dicotylédones.*** — La tige se compose de faisceaux fibro-vasculaires et de cellules disposées par couches concentriques, et dont la croissance est ***exogène.*** Cette tige est ordinairement rameuse.

Les racines ne présentent ni moelle ni étui médullaire, et sont le plus ordinairement simples et pivotantes.

Les feuilles présentent presque toujours les nervations *palmée* ou *pennée*. C'est dans cette classe que nous trouvons les véritables feuilles composées et les feuilles simples à contours découpés. Les cycles offrent souvent la divergence 2/5, et rarement celle 1/3.

Les fleurs sont ordinairement complètes et portent un calice et une corolle; les verticilles floraux se composent le plus souvent de cinq parties ou de multiples de cinq.

117. *Plantes monocotylédones.* — La tige se compose aussi de faisceaux fibro-vasculaires et de cellules, mais les faisceaux sont disséminés dans la masse du parenchyme et ne forment pas de couches concentriques. La croissance est *endogène*.

Les racines, quand elles ont un grand diamètre, ont la même structure que la tige. Quand elles sont petites, les faisceaux, au lieu d'être disséminés dans le parenchyme, se réunissent pour former un axe. C'est dans les monocotylédones que se rencontrent les racines multiples et souvent les racines aériennes.

Les feuilles sont *rectinervées*, sans nervures ramifiées, ou n'émettant que des nervures secondaires qui se courbent un peu de haut en bas et se relèvent vers le sommet de la feuille sans se disposer en réseau. Jamais les feuilles ne sont composées; en général elles sont alternes et jamais véritablement opposées ou verticillées; elles forment souvent le cycle représenté par la fraction 1/3.

Les fleurs sont ordinairement complètes. Le calice et la corolle se confondent souvent en une seule enveloppe nommée *périanthe*, formée le plus fréquemment de six folioles. En effet, les parties de la fleur sont presque toujours trois ou des multiples de ce nombre.

118. *Plantes acotylédones.* — La structure de ces plantes est en général très-simple; quelques-unes ne sont composées que de cellules; d'autres, mais en petit nombre, présentent des faisceaux fibro-vasculaires; chez ces dernières, dont les fougères sont un exemple, la tige peut acquérir une taille considérable; les faisceaux, ordinairement dépourvus de trachées déroulables, se trouvent seulement à la périphérie, où ils forment une couche dure et foncée.

Les racines sont toujours adventives, fréquemment elles sont aériennes. Leur organisation est la même que celle de la tige.

Les feuilles de fougères ont des ramifications en réseau plus compliquées que celles des dicotylédonées; elles peuvent cependant être entières, portées ou non sur un pétiole; on en trouve d'alternes et d'opposées.

Les fleurs n'existent pas; la reproduction se fait à l'aide de spores (*fig.* 132) portées ordinairement à la face inférieure des feuilles.

Les plantes cellulaires sont uniquement composées de tissu utriculaire qui forme une masse homogène rarement verte. On n'y distingue ni tiges, ni racines, ni feuilles. Sur certains points du parenchyme se développent de petites cavités nommées *conceptacles*, dans lesquelles se développent les spores.

CLASSIFICATION.

De la classification du règne végétal. — Espèce, genre et variété. — Des classifications artificielles. — Système de Linné. — De la méthode naturelle. — Familles naturelles.

119. **Espèce.** — Toute classification a pour but de grouper un grand nombre d'espèces, de les réunir en séries distinctes, de façon à ce que l'observateur puisse facilement se retrouver au milieu du nombre immense d'êtres qui habitent le globe terrestre. L'*espèce*, chez les végétaux aussi bien que chez les animaux, est l'ensemble des individus descendus directement d'une paire primitive et semblable à eux en tout ce qui est essentiel.

120. **Variété.** — Si l'on considère les différents individus qui font partie d'une espèce, on voit que tous ne reproduisent pas exactement les caractères physiques de leurs parents. Ce sont ces légères différences individuelles qui constituent les *variétés*.

Les variétés héréditaires constituent les *races*.

Une espèce peut renfermer un grand nombre de races, mais elle est toujours invariable et tient à l'essence même des êtres organisés. Deux espèces, même très-voisines, ne produisent pas entre elles, ou si elles produisent leurs descendants sont inféconds.

121. **Hybrides.** — Chez les végétaux on peut produire des métis aussi bien que chez les animaux; on les désigne sous le nom d'*hybrides*.

On peut assez facilement obtenir des hybrides de plantes faisant partie d'un même genre; pour cela on isole le végétal qui doit produire les graines, on enlève les étamines avant leur formation et on dépose sur le stigmate un peu de pollen pris sur la plante dont on veut avoir des produits croisés. C'est en croisant les races ensemble que les jardiniers obtiennent des variétés si nombreuses de fleurs. L'hybride peut être féconde, mais elle l'est toujours moins que ses parents; abandonnée à elle-même, sa fécondité disparait, ou elle tend à prendre exclusivement le caractère d'un de ses parents. Aussi ne voit-on jamais se créer d'espèces intermédiaires, et l'espèce étant fondamentale, doit être prise pour base de classification.

Dans le règne végétal nous retrouvons les mêmes lois que dans le règne animal : en réunissant les espèces les plus voisines on constitue les *genres*, des genres on forme les *familles*, des familles les *ordres*, des ordres les *classes*, etc...

Nous avons déjà vu (*Zoologie*, p. 154) qu'il y avait deux sortes de classifications :

La classification méthodique;

La classification systématique.

Dans cette dernière on ne se sert que d'un petit nombre de caractères pris arbitrairement.

Dans les méthodes on se sert de l'ensemble des caractères en donnant plus de valeur aux plus importants.

122. **Classifications artificielles.** — Les premiers essais de classification des végétaux sont des systèmes. Le premier est celui de Tournefort, il commença par diviser le règne végétal en deux sections : les herbes et les arbres, puis il s'appuya sur des caractères secondaires tirés principalement de la disposition des enveloppes florales. Ce système péchait par la base, puisque certaines espèces peuvent, suivant le climat, être arborescentes ou herbacées. Le ricin, par exemple, dans notre pays est une petite plante annuelle, dans le Midi c'est un arbuste persistant pendant des années.

123. **Système de Linné.** — En 1734 parut le système de Linné, qui remplaça celui de Tournefort; il est basé sur les différences qu'offrent les végétaux sous le rapport des diverses parties essentielles de la fleur, mais surtout des étamines.

Le règne végétal tout entier est ainsi divisé en vingt-quatre classes.

Une de ces classes, placée la dernière, comprend les plantes qui n'ont pas de fleurs visibles, et est désignée pour cette raison sous le nom de *cryptogames*.

Les plantes à fleurs apparentes ou *phanérogames* se divisent en vingt-trois classes, suivant qu'elles renferment dans la même enveloppe florale des étamines et des pistils, ou que ces organes sont portés sur des fleurs différentes.

Linné désignait les premières sous le nom de *monoclines;*

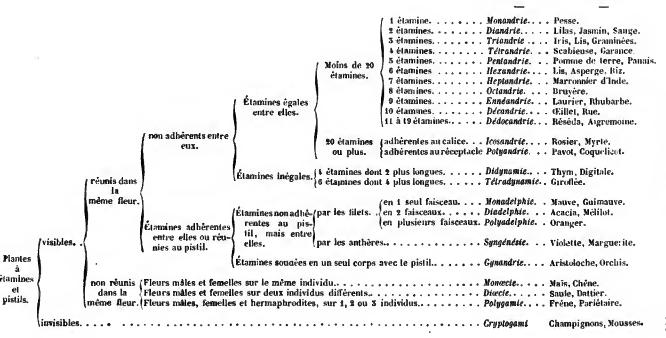
Les deuxièmes sous celui de *diclines*.

Il subdivise ensuite ces deux groupes en se basant sur les caractères des étamines, comme le tableau ci-contre peut le montrer.

124. **Application du système de Linné.** — Lorsque l'on veut déterminer le nom d'une plante à l'aide de ce système de classification, on examine tour à tour les différentes parties qui ont servi de caractères à la classe, puis à l'ordre, puis au genre; arrivé à cette division, on compare la plante aux espèces du même genre et on arrive ainsi à sa personnification exacte.

Si l'on suppose que la plante qu'il s'agit de déterminer ait des fleurs à deux étamines et à un pistil, elle appartiendra à la *diandrie monogynie;* si ces fleurs sont monopétales et régulières et son fruit en capsule, ce sera un lilas; si au lieu de capsule elle porte des drupes, ce sera un olivier;

TABLEAU DE LA CLASSIFICATION DES PLANTES D'APRÈS LE SYSTÈME DE LINNÉ



							CLASSES	EXEMPLES
Plantes à étamines et pistils.	visibles.	réunis dans la même fleur.	non adhérents entre eux.	Étamines égales entre elles.	Moins de 20 étamines.	1 étamine.	*Monandrie.*	Pesse.
						2 étamines.	*Diandrie.*	Lilas, Jasmin, Sauge.
						3 étamines.	*Triandrie*	Iris, Lis, Graminées.
						4 étamines.	*Tétrandrie.*	Scabieuse, Garance.
						5 étamines.	*Pentandrie.*	Pomme de terre, Panais.
						6 étamines	*Hexandrie.*	Lis, Asperge, Riz.
						7 étamines.	*Heptandrie.*	Marronnier d'Inde.
						8 étamines.	*Octandrie.*	Bruyère.
						9 étamines.	*Ennéandrie.*	Laurier, Rhubarbe.
						10 étamines.	*Décandrie.*	Œillet, Rue.
						11 à 19 étamines.	*Dédocandrie.*	Réséda, Aigremoine.
					20 étamines ou plus.	adhérentes au calice.	*Icosandrie.*	Rosier, Myrte.
						adhérentes au réceptacle	*Polyandrie.*	Pavot, Coquelicot.
				Étamines inégales.		4 étamines dont 2 plus longues.	*Didynamie.*	Thym, Digitale.
						6 étamines dont 4 plus longues.	*Tétradynamie.*	Giroflée.
			Étamines adhérentes entre elles ou réunies au pistil.	Étamines non adhérentes au pistil, mais entre elles.	par les filets.	en 1 seul faisceau.	*Monadelphie.*	Mauve, Guimauve.
						en 2 faisceaux.	*Diadelphie.*	Acacia, Mélilot.
						en plusieurs faisceaux.	*Polyadelphie.*	Oranger.
					par les anthères.		*Syngénésie.*	Violette, Marguerite.
				Étamines soudées en un seul corps avec le pistil.			*Gynandrie.*	Aristoloche, Orchis.
		non réunis dans la même fleur.	Fleurs mâles et femelles sur le même individu.				*Monœcie.*	Maïs, Chêne.
			Fleurs mâles et femelles sur deux individus différents.				*Diœcie.*	Saule, Dattier.
			Fleurs mâles, femelles et hermaphrodites, sur 1, 2 ou 3 individus.				*Polygamie.*	Frêne, Pariétaire.
	invisibles.						*Cryptogami*	Champignons, Mousses.

si au lieu de capsules et de drupes elle porte des baies, et si le tube de la corolle est long et à cinq divisions, ce sera un jasmin.

125. Ce système est fondé sur des lois arbitraires; Linné sentit lui-mêmes les défauts de son travail, et il tenta, sous le titre de *Fragments de la méthode naturelle*, un autre essai de classification plus méthodique. Mais il n'indiqua pas par quelles séries d'idées il arrivait aux conclusions qu'il tirait, et il fut plutôt guidé par les inspirations de son génie que par des observations suivies.

126. **Méthode naturelle.** — Les premières bases d'une méthode naturelle ont été posées par Bernard de Jussieu, chargé de diriger les plantations du jardin botanique de Trianon; il ne publia rien, mais fit ranger méthodiquement les plantes dans les parterres.

Vingt-cinq ans après, Antoine-Laurent de Jussieu, neveu de Bernard, publia en 1789 un ouvrage où il exposait les caractères des genres connus, distribués en *familles naturelles*. Pour cela Antoine-Laurent se basait sur l'étude de toutes les parties d'une plante.

Il ne donna pas à tous les caractères une valeur égale, il les mesura d'après leur importance; c'est ce que l'on a désigné sous le nom de principe de la *Subordination des caractères*, qui, d'après cette méthode, sont pesés et non comptés. Un caractère de premier ordre équivaut à plusieurs du second, et un du second à plusieurs du troisième. L'observation et l'expérience déterminent la valeur des caractères.

127. **Familles naturelles.** — Pour arriver aux familles naturelles, de Jussieu examina spécialement quelques familles composées de plantes qui avaient entre elles les plus grands rapports, et qui évidemment devaient rentrer dans un même cadre. Il étudia quels étaient leurs caractères communs, et quels étaient ceux qui les distinguaient des familles voisines; il arriva ainsi à évaluer l'importance de tel ou tel caractère.

Les familles que L. de Jussieu prit d'abord pour type de ses études étaient les graminées, — les liliacées, — les labiées, — les composées, — les ombellifères, — les crucifères, — les légumineuses.

DIVISION DES PLANTES EN DICOTYLÉDONES, MONOCOTYLÉDONES, ACOTYLÉDONES.

128. De Jussieu partagea d'abord le règne végétal en trois embranchements :

Les *acotylédones*,
Les *monocotylédones*,
Les *dicotylédones*,

Suivant que l'embryon ne présentait pas de cotylédon, ou qu'il y en avait un ou deux. Nous avons insisté (Voy. p. 117 et suiv.) sur les caractères qui appartiennent à ces différents groupes.

DICOTYLÉDONES.

129. Pour établir des coupes dans l'embranchement des dicotylédones, Laurent de Jussieu se basa sur l'étude des organes de la reproduction, comme étant les plus importants.

Il distingua les fleurs *monoïques*, qui portent à la fois un pistil et des étamines, et les fleurs *dioïques*, où ces parties sont séparées. Ces dernières, ou *diclines*, comprennent presque tous les arbres de nos bois.

Les plantes monoïques furent subdivisées, d'après la forme de la corolle, en *apétales*, *monopétales* ou *gamopétales* et *polypétales*.

130. **Dicotylédones monoïques, apétales.** — Les plantes qui forment cette division ont des fleurs dépourvues de corolle et ne présentant que le calice.

Chez ces plantes le nombre cinq se retrouve rarement dans les diverses parties de la fleur ; le nombre trois est au contraire fréquent. — Les principales familles de ce groupe sont :

Les *aristolochiées*, ex. : l'aristoloche

Les *laurinées*, ex. : le laurier.

Les *polygonées*, ex. : la rhubarbe.

Les *nyctaginées*, ex. : la belle-de-nuit.

131. Si nous prenons pour exemple de ce groupe l'aristoloche (*fig.* 136), nous trouverons une fleur à étamines épigynes, un calice adhérent à l'ovaire, prolongé au-dessus de lui en un tube. Les étamines, au nombre de dix à douze, sont réduites à des anthères presque sessiles portées sur un



Fig. 136.



Fig. 137.

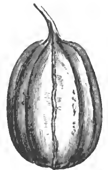


Fig. 138.

disque annulaire. L'ovaire, à six loges, renferme de nombreux ovules attachés à l'angle interne (*fig.* 137). Il devient un fruit capsulaire (*fig.* 138) à déhiscence loculicide. La tige est herbacée et grimpante, les feuilles alternes.

132. **Dicotylédones monoïques monopétales.** — Les monopétales sont caractérisées par l'existence d'une corolle composée de pétales soudés. Elle se divise, d'après le mode d'insertion des pétales, en quatre classes :

Les *hypocorollées*, dont la corolle, qui est soudée aux étamines, est insérée sous le réceptacle (ex. : famille des labiées, des jasminées, des solanées, des convolvulacées) ;



Fig. 139. — Sauge.

Les *péricorollées*, dont la corolle est insérée sur le calice (ex. : famille des bruyères, des campanulacées) ;

Les *épicorollées synanthérées*, dont la corolle est insérée sur l'ovaire et dont les anthères sont soudées entre elles (ex. : famille des composées) ;

Les *épicorollées chorisanthérées*, dont la corolle est également insérée sur l'ovaire, mais dont les anthères sont distinctes.

Nous allons passer en revue quelques-unes des principales familles de monopétales.

Labiées. — Ces plantes, presque toujours herbacées, ont une tige carrée, des feuilles simples et opposées, un calice à cinq pétales (*fig.* 139), une corolle à cinq pétales, divisée en deux lèvres ; les étamines sont au nombre de quatre. L'ovaire, à quatre loges, renferme deux ovules, dont l'un avorte. Le fruit est composé de quatre achaines, le calice est persistant.

Exemples : La sauge, la mélisse, la menthe, le thym, le serpolet, la marjolaine, le patchouly, la lavande.



Fig. 140. — Tabac.

133. *Solanées.* — Les solanées sont ordinairement herbacées et remarquables par leurs propriétés vénéneuses et narcotiques. Le calice est persistant et composé de cinq sépales ; la corolle, régulière, a cinq pétales soudés ; l'androcée présente cinq étamines libres, le pistil est formé par un ovaire à deux loges, un placenta charnu supportant un grand nombre d'ovules. Le fruit devient ordinairement une capsule à deux loges.

Exemples : La pomme de terre, le tabac (*fig.* 140), la belladone, la stramoine, la jusquiame, la tomate, l'aubergine.

134. *Campanulacées.* — Les plantes de cette famille sont herbacées, et la fleur présente ceci de remarquable, que les étamines sont insérées directement sur le calice. La corolle est persistante; le fruit, ordinairement à trois loges, s'ouvre par des ouvertures placées sur les parois (Voy. *fig.* 115).

135. *Composées.* — Dans cette famille les fleurs sont ramassées à l'extrémité de l'axe, dilaté de façon à constituer un *capitule* entouré d'un involucre d'un ou de plusieurs rangs de folioles. Cette réunion de fleurs présente l'aspect d'une fleur unique.

Tantôt toutes les fleurs du capitule sont semblables, tantôt celles du centre diffèrent de celles de la périphérie. Les fleurs se distinguent en *fleurons* et *demi-fleurons*.

Chez les premiers, la corolle est régulière et divisée en cinq lobes égaux.

Chez les seconds, la corolle est rejetée sur le côté en forme de languette (Voy. *fig.* 71).

On a divisé les composées en :

Flosculaires, où le capitule entier est formé de fleurons;

Semi-flosculaires, où le capitule est formé de demi-fleurons;

Radiées (*fig.* 141), où le capitule est formé au centre de fleurons et à la circonférence de demi-fleurons.

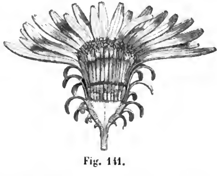


Fig. 141.

Comme exemples de flosculaires, on peut citer le chardon et l'artichaut; de semi-flosculaires, la chicorée, la laitue, le pissenlit, et de radiées les marguerites, le soleil, le dahlia, etc.

136. **Dicotylédones monoïques polypétales.** — Dans cette division, les pétales sont indépendants. On l'a subdivisée, d'après le mode d'insertion des étamines, en :

Epipétales, ex. : famille des ombellifères.

Hypopétales, ex. : famille des papavéracées, des ampélidées, des crucifères, des malvacées.

Péripétales, ex. : famille des rosacées, des légumineuses.

137. *Ombellifères.* — La famille des ombellifères est remarquable par son inflorescence en *ombelle simple* ou *composée*, qui permet de la reconnaître au premier abord. Ces plantes, pour la plupart herbacées, portent

des fleurs dont le calice a cinq divisions (*fig.* 142), la corolle cinq pétales, et pourvues de cinq étamines; l'ovaire est placé au-dessous de la co-

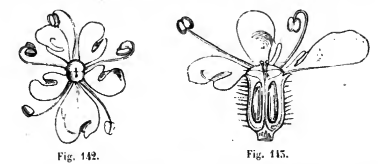


Fig. 142. Fig. 143.

rolle (*fig.* 143), et présente deux loges renfermant chacune un seul ovule; le fruit consiste en deux achaines.

Exemples : La ciguë, le cerfeuil, la carotte, le panais, l'angélique.

138. *Crucifères.* — Les crucifères sont ainsi appelées à cause de la forme de leurs fleurs, dont les sépales et les pétales sont disposés en croix (Voy. *fig.* 66). Les sépales sont au nombre de quatre et alternent avec quatre pétales. On trouve six étamines, dont quatre grandes et deux petites (*fig.* 144); l'ovaire est à deux loges à placentas pariétaux, chargés de nombreux ovules; le fruit est une silique (*fig.* 126).

Fig. 144.

Exemple : La moutarde, le choux, le colza, la giroflée.

139. *Papavéracées.* — Dans cette famille nous retrouvons des verticilles qui se croisent. Le calice, en général à deux sépales, alterne avec la corolle à quatre pétales; le pistil est à plusieurs loges, le stigmate sessile (*fig.* 103), et la déhiscence se fait par des pores.

Exemples : Le coquelicot, le pavot, dont on extrait l'opium, la grande éclaire.



Fig. 145.
Fleur de Fraisier.

140. *Rosacées.* — Dans cette famille les étamines se disposent en cercle vers le sommet du tube calicinal; les tiges peuvent être herbacées ou arborescentes, les feuilles sont en général alternes. Ordinairement le calice est monosépale et présente cinq divisions (*fig.* 145), les pétales sont au nombre de cinq, les étamines en nombre multiple quinze ou vingt. Le pistil est placé au fond d'une coupe

formée par le réceptacle (*fig.* 146); il est uniloculaire et présente un seul ovule sans albumen. Le fruit devient une drupe (*fig.* 121)

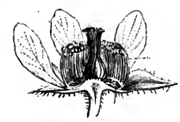


Fig. 146.

Les *rosacées* se subdivisent en plusieurs groupes :

Les *rosacées proprement dites*. Ex.: le rosier.

Les *pomacées*, ex. : le pommier, le poirier.

Les *fragariées*, ex. : le fraisier.

Les *drùpacées*, ex. : le prunier, l'abricotier, le pêcher, le cerisier, l'amandier.

141. *Légumineuses.* — La famille des légumineuses est désignée souvent sous le nom de *papillonacée*, à cause de la forme singulière de la fleur, dont nous avons déjà étudié la disposition. (Voy parag. 74, *fig.* 69).

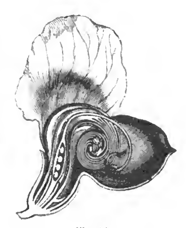


Fig. 147.
Coupe de Fleur papillonacée.

Ces plantes sont ou herbacées ou arborescentes; les étamines sont en nombre double des pétales; elles sont *diadelphes*, c'est-à-dire réunies en faisceau à leur base (*fig* 85), à l'exception de celle qui est superposée à l'étendard; l'ovaire est uniloculaire, à placenta pariétal et portant deux séries d'ovules sans albumen (*fig.* 147). Le fruit est une *gousse* (parag. 104, *fig.* 112).

Exemples : le trèfle la luzerne, le sainfoin, le genet, l'acacia, la casse, la sensitive, la fève, le haricot, le pois.

142. **Dicotylédones diclines.** — Ce groupe comprend deux grandes familles, celle des *amentacées* et celle des *conifères*.

143. *Amentacées.* — Les amentacées comprennent la plupart des arbres de nos forêts; les fleurs sont toujours unisexuées. Les fleurs mâles sont en chàtons (*fig.* 148) et consistent en une écaille calicinale (*fig.* 149), à

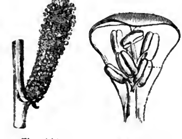


Fig. 148.
Chaton mâle
de Saule.

Fig. 149.
Fleur mâle.


Fig. 150.
Fleur femelle.

la face supérieure de laquelle sont attachées des étamines au nombre de six ou davantage.

Les fleurs femelles (*fig.* 150) sont généralement axillaires, tantôt solitaires, tantôt en chatons.

On a subdivisé les amentacées en plusieurs groupes, basés sur la disposition du calice, des étamines, de l'ovaire. On y distingue :

Les ***salicinées***, ex. : le saule et le peuplier.

Les ***bétulinées***, ex. : le bouleau et l'aulne.

Les ***ulmacées***, ex. : l'orme.

Les ***carpinées***, ex. : le charme, le noisetier, le coudrier.

Les ***juglandées***, ex. : le noyer.

Les ***quercinées***, ex. : le chêne, le hêtre, le châtaignier.

144. *Conifères.* — Les conifères, connus vulgairement sous le nom d'arbres verts, sont des arbres à feuilles presque toujours aciculaires, qui restent fixées aux branches même pendant l'hiver.

Les fibres du bois offrent une structure remarquable, que nous avons déjà étudiée. (Voy. parag. 29, *fig.* 25 et 26.)

Les fleurs sont monoïques ou dioïques, et disposées en chatons (*fig.* 151) ou en cônes. Les fleurs mâles sont formées par une étamine nue (*fig.* 152) ou accompagnée d'une écaille; les fleurs femelles (*fig.* 153 et 154) consistent en un

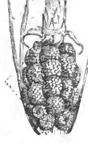

Fig. 151.
Fleur de Pin.

Fig. 152.
Fleur mâle.


Fig. 153.
Fleur femelle.


Fig. 154.
Fleur femelle
vue en dedans.

ou deux ovules nus portés sur une écaille, et se groupant en forme de cône sur un axe commun.

Les fruits sont agrégés et forment un cône (Voy. *fig.* 128); l'embryon a plusieurs cotylédones.

Exemples : Les pins, les sapins, les mélèzes, les genévriers, les cyprès, les ifs, les thuyas.

MONOCOTYLÉDONES.

145. Nous avons déjà insisté (Voy. parag. 106) sur les caractères principaux du groupe des monocotylédones. Les végétaux dont il est composé sont moins nombreux que les dicotylédones. Quelques familles offrent une très-grande importance. Effectivement on range dans cette division les aroïdées, les graminées, les palmiers, les asparaginées, les narcissées, les liliacées, les iridées, les orchidées, etc.

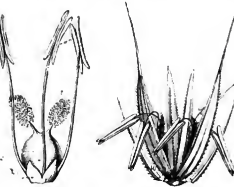


Fig. 155. — Seigle.

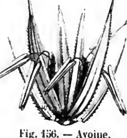


Fig. 156. — Avoine.

146. La famille des *graminées* comprend des plantes pour la plupart herbacées, à rhizome; la tige, ordinairement creuse, porte le nom de *chaume*. — Leurs feuilles sont engainantes; les fleurs sont disposées en épi. Leur fruit est une caryopse, et contient un albumen très-farineux, qui rend ces plantes si utiles en fournissant à l'homme un aliment sain et abondant, la farine. Le froment, le seigle (*fig.* 155), l'avoine (*fig.* 156), le maïs, le riz, la canne à sucre se rangent dans cette famille.

147. La famille des *palmiers* (*fig.* 157) rend des services immenses aux habitants des pays où poussent ces végétaux. Leur bois est employé pour les constructions; leurs feuilles fournissent des toitures et des vêtements; les fibres servent à fabriquer des



Fig. 157.

cordages; enfin les fruits sont, pour la plupart, nourrissants et d'une agréable saveur. — Des populations entières se nourrissent presque exclusivement de dattes. Le périsperme de la noix de coco est d'abord presque fluide, et fournit une crème acidule. Enfin on extrait l'huile de palme d'un arbre de cette famille.

148. Les *liliacées* sont cultivées à la fois, et comme plantes d'ornement, et pour l'emploi culinaire : telles sont différentes espèces du genre ail (oignons, échalottes, poireaux). Chez la scille (*fig.* 158, 159 et 160)

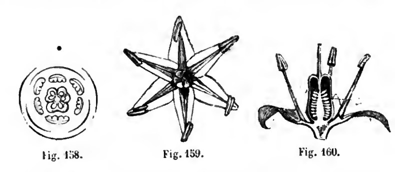


Fig. 158. Fig. 159. Fig. 160.

et l'aloès, les sucs acquièrent des propriétés que l'on a utilisées pour la médecine.

149. Parmi les *iridées* on doit citer en première ligne les iris (*fig.* 161) et le safran.

150. Les *orchidées* ne sont en France d'aucune utilité; elles ne sont recherchées qu'à cause de la bizarrerie et de la beauté de leurs fleurs (*fig.* 162 *et* 163). — Dans les pays chauds, les tubercules du *salep* sont em-

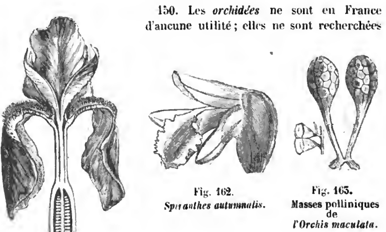


Fig. 161. — Iris.

Fig. 162. *Spiranthes autumnalis.*

Fig. 163. Masses polliniques de *l'Orchis maculata.*

ployés pour la nourriture. Enfin la vanille (*fig.* 164), dont le fruit renferme un délicieux parfum, fait partie de cette famille.

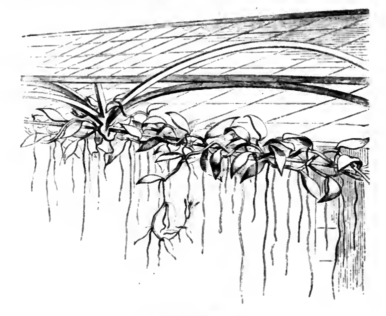


Fig. 164. — Vanille.

ACOTYLÉDONES.

151. Les acotylédones sont quelquefois uniquement composées de cellules et dépourvues de vaisseaux et de stomates; quelquefois elles en sont pourvues : aussi les divise-t-on en plantes cellulaires et en plantes cellulo-vasculaires.

152. **Plantes cellulaires.** — Ces plantes comprennent plusieurs familles, parmi lesquelles nous citerons les algues, les champignons, les lichens et les mousses.

153. Les *algues* (*fig.* 165) ont besoin pour vivre d'un milieu aquatique; on appelle *conferves* celles qui habitent les eaux douces, et *fucus* ou varechs celles qui vivent dans la mer. Ces dernières sont

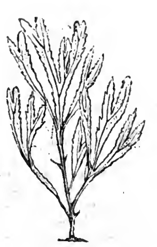


Fig. 165. — Algue.



Fig. 166. — Agaric.

ordinairement soigneusement recueillies pour en extraire la soude et l'iode, qui se trouvent en abondance dans leurs tissus.

154. Les *champignons* (*fig.* 166) renferment à la fois des espèces comestibles et des espèces très-vénéneuses.

155. Les *lichens* (*fig.* 167 et 168) forment des expansions ordinairement sèches qui recouvrent les pierres, la terre, l'écorce des arbres. En Islande et en Laponie, ces plantes servent à la nourriture des hommes et des animaux. Quelques espèces

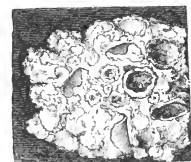


Fig. 167. — Lichen.



Fig. 168. — Coupe d'un lichen.

fournissent une matière mucilagineuse employée en médecine; d'autres, telles que l'orseille, servent à préparer une matière rouge particulière.

156. Les *mousses* (*fig.* 169) abondent à la surface de la terre; elles sont formées par de petites tiges grêles *p*, couvertes de feuilles *f* menues et entièrement cellulaires; elles portent à leur extrémité les organes de fructification. — Les mousses ne sont d'aucun usage économique; elles servent à entretenir un certain degré d'humidité et de fraîcheur à la surface de la terre.

157. **Plantes cellulo-vasculaires.** — Ces végétaux, formés d'abord de cellules, acquièrent, en se développant, des vaisseaux et des fibres. On range dans cette famille les fougères, les équisétacées et les lycopodiacées.

158. Les *fougères*, dans nos climats, n'attei-



Fig. 169. — Mousse.

gnent qu'à une taille peu élevée (*fig.* 170); mais dans les pays chauds

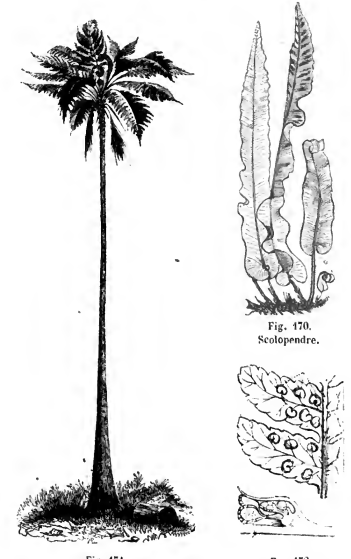


Fig. 170.
Scolopendre.

Fig. 171.
Fougère en arbre.

Fig. 172.
Organes de fructification.

elles forment de véritables arbres (*fig.* 171). Les organes de fructification sont portés à la face inférieure des feuilles (*fig.* 172). — Aux époques

géologiques antérieures à la nôtre, cette famille était très-richement représentée, et quelques espèces avaient des dimensions considérables.

Beaucoup de fougères contiennent un principe amer, et quelquefois purgatif qui les fait employer en médecine.

159. Les équisétacées sont remarquables par la disposition de leur tige creuse à l'intérieur et dont la cavité est interrompue de distance en distance par des cloisons qui répondent à autant d'articulations.

GÉOLOGIE

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

Origine de la Terre. — Différentes couches qui la composent.

1. La géologie (de γῆ terre, et λόγος discours), est la science qui traite de la constitution physique du globe terrestre.

Elle en étudie les différentes couches, examine les changements qui s'y sont produits, et cherche les causes qui ont pu agir.

Elle comprend également l'histoire des restes organisés que l'on trouve enfouis dans le sein de la terre.

2. **Origine de la terre.** — Le globe terrestre a la forme d'un sphéroïde légèrement aplati aux deux pôles; il n'a pas toujours présenté l'aspect que nous lui connaissons aujourd'hui : primitivement tout porte à croire que ce n'était qu'une masse incandescente et en fusion. En se refroidissant, sa surface s'est solidifiée peu à peu. Une première croûte d'abord très-mince a ainsi été formée; mais elle a dû se fendre bientôt sous l'effort du liquide en fusion sur lequel elle reposait, et ce n'est que graduellement qu'elle a pu acquérir une épaisseur assez considérable pour résister à l'effort qu'elle avait sans cesse à soutenir.

C'est alors que les eaux qui primitivement étaient suspendues dans l'atmosphère à l'état de vapeur, ont commencé à se condenser, et sont tombées sous forme de pluie sur la croûte terrestre dont elles ont désagrégé sur divers points les particules; puis laissant déposer les matières qu'elles tenaient en suspension elles ont ainsi formé des couches solides. Mais pendant longtemps encore il est arrivé souvent que la masse centrale incandescente brisait et soulevait l'enveloppe solide qui la couvrait et se frayait un chemin pour répandre à sa surface des matières minérales en fusion qui ne tardaient pas à se solidifier.

3. **Différentes couches du globe.** — D'après ces faits, il est évident qu'il doit exister deux sortes de roches.

Les premières, de *formation ignée* ou *plutonique*, paraissent résulter de la solidification des matières qui primitivement étaient incandescentes. Elles sont disposées sans aucune espèce de régularité; leur masse présente ordinairement une structure plus ou moins cristalline qui rappelle leur origine.

Les secondes, de *formation aqueuse* ou *neptunienne*, ont été formées par

les sédiments que les eaux tenaient en suspension et qu'elles ont laissé déposer; elles doivent, par conséquent, contenir dans leur sein les débris, connus sous le nom de *fossiles*, provenant des animaux qui habitaient alors les eaux.

Ces couches ainsi formées sont *stratifiées*, c'est-à-dire déposées en lits plus ou moins réguliers, qui dans l'origine étaient tous horizontaux, mais qui sous l'influence de la pression intérieure ont pu être plus ou moins soulevés ou disloqués. Leur nature varie suivant la nature des sédiments qui les ont formés et qui pouvaient être ou argileux, ou calcaires ou arénacés.

Ces formations, d'origine aqueuse, sont de deux sortes :

Les unes sont marines, c'est-à-dire se sont déposées au fond de la mer.

Les autres sont d'eau douce, c'est-à-dire se sont déposées au fond des lacs ou des marécages.

C'est par l'étude des débris organiques qui sont renfermés dans la masse de ces couches que l'on peut juger de leur origine. Dans le premier cas, ils appartiennent à des animaux marins; dans le second cas, ils se rapportent à des types qui habitent exclusivement les eaux douces.

PHÉNOMÈNES VOLCANIQUES.

Volcans. — Nature et disposition des roches et autres produits auxquels ils donnent naissance. — Leur action physique et mécanique. — Volcans éteints. — Basaltes et Laves.

4. **Volcans; leur action physique et mécanique.** — L'épaisseur de l'écorce solide du globe est très-faible par rapport au diamètre de ce dernier. En effet, suivant toute probabilité, elle ne dépasse guère quarante kilomètres, le rayon terrestre ayant plus de six mille kilomètres. Or il arrive souvent que la masse incandescente qui occupe le centre de la terre se fraye un passage à travers la pellicule solide; il s'établit ainsi une communication entre l'intérieur et l'extérieur de notre sphère.

Ordinairement ces phénomènes se traduisent au dehors par des tremblements de terre et par la formation de *volcans*. Les volcans sont des sortes d'*évents* naturels par où s'échappent les gaz et les matières dont l'effort aurait brisé la pellicule terrestre s'ils n'avaient pu s'échapper au dehors.

Ainsi, les éruptions volcaniques suivent en général les tremblements de terre et ceux-ci cessent alors ou deviennent moins violents. Au contraire, quand un volcan cesse de fonctionner on remarque souvent que les tremblements de terre reprennent, ou augmentent d'intensité.

5. Lorsqu'un volcan se produit, les couches de l'écorce solide du globe sont d'abord soulevées; elles se bombent et finissent par se briser et se fendre; il se forme une ouverture qui livre passage aux matières qui ten-

daient à s'échapper au dehors. La butte qui résulte du soulèvement des couches porte le nom de *cône de soulèvement* et l'orifice qui se forme à son sommet est appelé *cratère de soulèvement* (*fig.* 1).



Fig. 1.
Cône et cratère de soulèvement.

Les cônes de soulèvement se distinguent des buttes que peuvent constituer les matières rejetées par le volcan, par ce fait que les couches des terrains préexistant sont inclinées autour de l'axe du cône, en se relevant de plus en plus de la base au sommet, et présentent une pente abrupte du côté du cratère de soulèvement (*fig.* 1). Les flancs du cône sont souvent sillonnés par des crevasses qui partent du cratère. Lorsque le volcan a été pendant quelque temps en activité, il arrive souvent que les matières rejetées par l'éruption s'accumulent autour du cône de soulèvement et forment un autre cône quelquefois d'une étendue très-considérable que l'on désigne sous le nom de *cône d'éjection*.

6. Le nombre des volcans est considérable. On en compte environ quatre cents qui ont été en activité depuis les temps historiques et plus de deux cents fonctionnent encore. En général, ils sont situés à peu de distance de la mer et se trouvent fréquemment dans des îles ou sur les côtes. Les plus remarquables par leur activité sont ceux de la chaîne des Andes et du Mexique en Amérique. En Océanie, ils sont très-nombreux. En Asie, il faut citer ceux des îles de la Sonde et du Kamtschatka. En Afrique, ceux des îles Canaries et de l'île de la Réunion. En Europe, les principaux sont l'Hécla en Islande, le Vésuve en Italie, l'Etna en Sicile, le Stromboli dans les îles Lipari.



Fig. 2.
Vésuve ancien.

Le Vésuve n'a pas toujours fonctionné. Avant l'année 79 de Jésus-Christ, où eut lieu l'éruption qui causa la mort de Pline et qui ensevelit Pompéia et Herculanum, les habitants n'avaient aucun souvenir de l'activité de ce volcan. Ses flancs étaient cultivés ou couverts de forêts (*fig.* 2). En 79, le Vésuve évidé à son centre, par l'éruption qui déblaya l'ancien cratère et en rejeta au loin les débris, fut réduit à un vaste cirque qui constitue ce que l'on nomme *le Somma*. C'est dans ce cirque que s'est formé le cône actuel,



Fig. 3.
Vésuve actuel.

qui est un cône d'éjection, et c'est le cratère de celui-ci qui s'obstrue pour se rouvrir à chaque éruption (*fig.* 3).

Le Stromboli a toujours été en activité; depuis plus de deux mille ans, il n'a pas cessé d'avoir des éruptions.

Les volcans peuvent être sous-marins et déterminer la formation d'îles (*fig.* 4 et 5).



Fig. 4. — Ile volcanique.



Fig. 5.

L'île Julia, qui parut en juillet 1831, au milieu de la Méditerranée, n'était que le sommet d'un immense cône submergé qui avait comblé une partie de la mer qui avait plusieurs centaines de mètres de profondeur.

L'île Santorin apparut également dans la Méditerranée à la suite de violents tremblements de terre. Quelquefois on ne voit pas d'île se former à la surface des eaux, et l'éruption ne se manifeste que par la chaleur et l'ébullition de la mer, la présence de pierres ponces qui nagent à sa surface et l'élévation du fond.

7. Nature et disposition des roches et autres produits des volcans. — Les matières qui déterminent la rupture de l'écorce du globe pour s'échapper par le cratère du volcan sont gazeuses, liquides ou solides. Les premières sont surtout formées de vapeur d'eau, puis d'acides chlorhydrique, carbonique, sulfhydrique, de gaz nitreux, de vapeur de soufre qui en se condensant produit des cristaux ou des concrétions et en brûlant donne naissance à de l'acide sulfureux.

Les matières liquides sont principalement à l'état de fluidité ignée; en se refroidissant elles se solidifient et constituent les roches connues sous le nom de laves, qui se rapportent aux silicates anhydres (silicates doubles d'alumine, de potasse, de soude et de chaux).

8. Laves. — Ces matières en fusion remplissent le cratère, puis se déversent et coulent sur les flancs du volcan en formant des coulées qui

varient d'aspect suivant la disposition du cratère, la pente sur laquelle elles descendent, etc. Quand la surface est unie (*fig.* 6), la lave s'étend en nappe comme en Islande où cette matière couvre un espace de près de quatre-vingt lieues carrées. Si la pente est rapide, elle coule comme une source et forme une coulée étroite. Quand la lave se refroidit et se consolide dans les crevasses et dans les cheminées volcaniques où elle s'était élevée, elle forme ce que l'on appelle des ***filons*** ou des ***dykes*** (*fig.* 7) qui coupent les couches du cône de soulèvement, lorsque ces dernières à raison de leur peu de cohérence ont été désagrégées par les agents extérieurs.

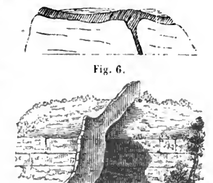


Fig. 6.

Fig. 7. — Dyke.

9. Quelquefois les volcans rejettent des matières à l'état de fluidité aqueuse, telles que de la boue ou même de l'eau.

Les matières solides lancées par les volcans sont souvent des cendres quelquefois en quantité immense et qui alors forment des nuages épais qui obscurcissent le jour et peuvent être transportés à des distances énormes. Ces cendres sont souvent accompagnées de débris plus volumineux. Ce sont des morceaux de pierres poreuses incandescentes appelées ***pouzzolanes*** et ***lapilli;*** des fragments de roches d'une grosseur énorme peuvent être lancés au loin. Ce sont ces matières qui en s'accumulant forment des dépôts ordinairement poreux que l'on désigne sous le nom de ***tufs***.

10. **Volcans éteints.** — Nous avons vu que les volcans ne sont pas toujours en activité et que d'une éruption à l'autre il peut s'écouler un temps considérable. Quelques-uns paraissent même pouvoir s'éteindre complétement. Il existe en effet des volcans présentant encore leur cratère de soulèvement, leurs dépôts de tufs, leurs coulées de laves et tantôt formés d'un seul cône de soulèvement, tantôt portant un cône d'é-



Fig. 8. — Chaîne des Puys.

ruption à leur centre, mais ne donnant aucun signe d'activité. La France,

qui aujourd'hui ne possède aucun volcan en activité, en était couverte anciennement. La chaîne des *Puys* (*fig.* 8), en Auvergne, est constituée par une suite de cônes volcaniques dont le sommet est creusé d'un cratère d'où partent de nombreuses coulées de laves et d'autres matières analogues connues sous le nom de basaltes. Ces laves recouvrent les couches anciennes de notre globe; donc elles sont plus récentes qu'elles; d'autre part, les cours d'eau que nous savons exister depuis les temps historiques, y ont creusé leur lit, ce qui prouve qu'elles se sont répandues à une époque antérieure à celle où nous étions sur la terre, et probablement ces cratères étaient en activité à la fin de la période tertiaire.

Les bords du Rhin, la Saxe, la Bohême, la Hongrie, la Transylvanie, le Caucase, la Grèce, l'Archipel, nous offrent de nombreux exemples de ces volcans éteints; le centre de l'Asie, l'Afrique, l'Amérique en présentent encore davantage; à une époque qui a précédé la nôtre, la terre paraît avoir été couverte par une quantité énorme de volcans en activité.

11. **Basaltes.** — Les volcans éteints ont donné naissance à des matières analogues à nos laves, mais d'une composition un peu différente et désignées sous le nom de *Basaltes*. Ce sont des roches d'un noir foncé qui forment des dépôts assez épais qui ordinairement se divisent en colonnes prismatiques assez régulières (*fig.* 9). Cette apparence est due à ce

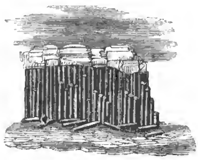


Fig. 9. — Basaltes prismatiques.

que la masse de basalte, parfaitement homogène dans sa composition, s'est refroidie lentement et s'est fendue en divers sens avec une grande régularité, ce qui a divisé la roche en un grand nombre de prismes semblables entre eux, et qui leur donne souvent l'aspect de véritables colonnes. Partout où il y a des volcans éteints on rencontre ces masses basaltiques; quelques-unes se divisent en prismes tellement réguliers qu'elles affectent des formes géométriques et architecturales parfaites. Les plus célèbres sont celles qui forment la chaussée des Géants en Irlande, la grotte de Fingal dans l'île de Staffa, l'une des Hébrides. En France, le Vivarais offre des effets analogues. La chaussée basaltique de

la petite rivière du Volant (Ardèche), (*fig.* 10) rappelle la chaussée des Géants.

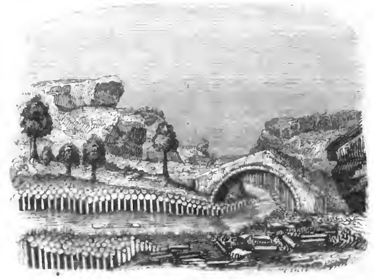


Fig. 10.

12. Les *Diorites*, les *Trapps* et les *Trachytes* sont des roches qui se rencontrent également aux environs des volcans éteints et qui ont été produites par eux; elles présentent d'ailleurs une grande analogie avec les basaltes.

CHALEUR CENTRALE.

Sources thermales. — Puits artésiens.

13. **Chaleur centrale.** — Puisque le centre du globe est occupé par une masse incandescente, il est évident que plus on s'enfoncera dans l'intérieur de la terre, plus la température s'élèvera. En effet, on peut mesurer avec exactitude cet accroissement de température; on a constaté qu'à une faible profondeur, variable suivant les localités, les changements de température ne se font plus sentir. Au-dessous de ce point, la chaleur augmente d'environ un degré centigrade par 33 mètres. Si les mêmes choses se passent à de grandes distances, au-dessous du sol, à 3 kilomètres, la température serait celle de l'eau bouillante, et à 20 kilomètres, on aurait 666°; la plupart des roches seraient alors en fusion; enfin, au centre de la terre, si la loi se continuait régulièrement, la température serait de

200,000°; rien ne peut nous donner une idée d'une chaleur pareille, aussi il est probable qu'à une certaine profondeur il se fait un équilibre général de température suffisant pour maintenir tous les corps en fusion

14. **Sources thermales.** — D'après ce que nous venons de dire, on comprend facilement que les eaux qui arrivent à la surface de la terre d'une profondeur considérable, aient une température égale à celle des couches qu'elles ont traversées. Il ne faut que 3 kilomètres de profondeur pour qu'elles soient bouillantes. On comprend aussi facilement que, pendant les tremblements de terre, de nouvelles sources chaudes puissent apparaître. On désigne sous le nom de *thermales* ces sources dont la température est plus ou moins élevée. Quelquefois même l'eau est complétement vaporisée, et s'échappe avec bruit du sein de la terre en jets de vapeur portant le nom de *fumarolles*.

15. En Islande, il existe des sources nommées *geysers* (*fig.* 11), dont la

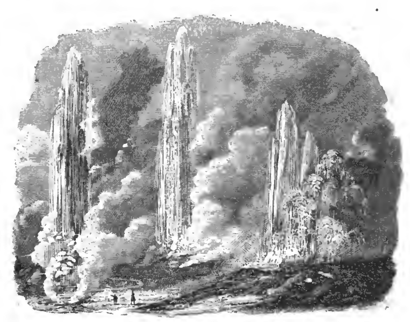


Fig. 11. — Geysers de l'Islande.

température est d'environ 100°, et qui, de demi-heure en demi-heure lancent à 50 mètres de hauteur une colonne d'eau de près de 6 mètres de diamètre.

Pour acquérir une température aussi élevée, il ne suffit pas que les eaux traversent des couches très-profondes, il faut encore qu'elles restent

quelque temps en contact avec elles. Dans leur trajet, elles dissolvent ordinairement d'assez fortes proportions de matières minérales qu'elles laissent ensuite déposer à la surface de la terre. C'est à raison des substances qu'elles contiennent que beaucoup de sources thermales sont employées en médecine. On donne communément le nom d'*eaux minérales* à celles qui tiennent en dissolution une quantité notable de substances inorganiques, et on les subdivise en *eaux gazeuses*, *eaux ferrugineuses*, *eaux sulfureuses*, *eaux salines*, etc. Suivant qu'elles doivent leurs caractères les plus remarquables à du gaz acide carbonique, à des sels de fer, à des sulfures alcalins ou à des sels tels que du sulfate de magnésie, du sulfate de soude, etc.

L'eau des geysers tient en dissolution une forte proportion de silice, qui se dépose bientôt, à l'état d'hydrate, et forme ainsi des monticules assez élevés, au centre desquels s'élève la colonne d'eau qui leur a donné naissance. Dans ces dépôts, il se trouve des débris organiques, particulièrement de végétaux, qui, tantôt passent à l'état siliceux, tantôt ne laissent que leurs empreintes.

Certaines eaux, grâce à l'acide carbonique dont elles sont chargées, peuvent dissoudre des quantités notables de carbonate de chaux qu'elles laissent déposer lorsqu'elles arrivent au contact de l'air. Il se forme ainsi des dépôts d'une étendue et d'une épaisseur parfois considérable, connus sous le nom de *tufs calcaires*. Ces eaux encroûtent les corps organisés qui y sont plongés, et se moulent sur eux comme on le voit dans beaucoup de localités en France, et particulièrement à Vichy et à Saint-Allyre, près de Clermont.

16. **Puits ordinaires**. — Une partie des eaux qui tombent à l'état de pluie à la surface de la terre, et une partie de celles qui coulent et forment les fleuves et les rivières, s'infiltrent dans le sol en traversant les assises perméables (*fig*.12 I, J, K) jusqu'à ce qu'elles soient arrêtées par une couche imperméable (H). Ce peut être une assise d'argile ou de grès ou de marnes argileuses. Elles s'accumulent alors et forment des nappes d'eau souterraines plus ou moins vastes que l'on peut atteindre en perçant les couches supérieures; c'est ainsi que l'on forme les *puits ordinaires* (1). Leur profondeur n'est généralement pas très-grande, car, surtout dans le bassin de Paris, les couches argileuses se montrent à peu de distance au-dessous du sol.

17. **Puits artésiens**. — Les différents terrains stratifiés s'étant déposés dans de vastes dépressions ou bassins se sont moulés sur eux et forment comme une série de cuvettes emboîtées, de plus en plus petites, qui ont ainsi fini par combler leur bassin. D'après leur mode de formation, on doit trouver sur les bords les couches les plus anciennes qui plongent et sont bientôt recouvertes par les plus récentes.

On comprend facilement que les eaux qui coulent ou qui tombent sur

la tranche des terrains perméables tels que des couches arénacées, s'y infiltrent. Si la couche de sable C est comprise entre deux couches d'argile B et D (*fig.* 12), l'eau ne pourra s'échapper et formera une nappe

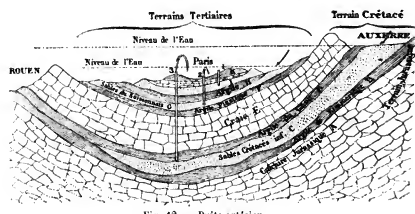


Fig. 12. — Puits artésien.

dont le niveau sera celui de l'affleurement de la couche sableuse sur le pourtour du bassin. Si, par conséquent, à un point 3, situé au centre du bassin, on pratique un sondage, et si on traverse les couches supérieures, et en dernier lieu la couche imperméable D, qui comprimait l'eau, celle-ci, obéissant aux lois qui régissent l'équilibre des liquides dans les vases communiquants, tendra à s'élever dans le trou ainsi pratiqué et à reprendre son niveau; on aura alors un *puits artésien* 3. L'eau s'élèvera d'autant plus que l'affleurement de la couche perméable sera plus élevé, et par conséquent si le point où on a fait le sondage est beaucoup plus bas que le pourtour du bassin, les eaux jailliront à une certaine hauteur au-dessus du sol; s'il est au même niveau, les eaux monteront dans le tube, mais ne dépasseront pas son orifice.

Donc, dans un puits ordinaire, les eaux sont simplement retenues par une couche imperméable sur laquelle elles reposent; dans un puits artésien, elles sont comprises entre deux couches imperméables, l'une supérieure, l'autre inférieure, et elles jaillissent par suite de la perforation de la première.

La température de l'eau des puits artésiens est d'autant plus élevée qu'elle provient de plus grandes profondeurs. Celle du puits de Grenelle, à Paris, qui est profond d'environ 550 mètres, atteint 30° centigrades.

18. Dans le bassin de Paris, il existe plusieurs nappes d'eau souterraines; quelques-unes sont situées dans des terrains qui font partie du système que nous étudierons plus tard sous le nom de *Parisien* ou *Éocène*. En effet, dans les couches inférieures de ce système, il existe une alternance



de lits de sable G et d'argile (F, H), c'est-à-dire toutes les conditions nécessaires à l'existence d'un puits artésien 2. Ces nappes d'eau peuvent être facilement atteintes sans que l'on ait besoin de creuser à de grandes profondeurs, mais elles sont peu abondantes.

Il en existe une autre d'une richesse considérable à la partie inférieure des terrains crétacés. Cette nappe d'eau, qui s'est infiltrée dans les sables crétacés inférieurs (D) qui affleurent du côté de la Champagne et de la Bourgogne et plongent ensuite vers Paris, est comprise entre l'*argile de Kimmeridge* (B), qui se rapporte à la partie supérieure du terrain jurassique, et l'*argile du Gault* (D), qui fait partie du terrain crétacé inférieur; l'eau que l'on y trouve provient donc des environs d'Auxerre, de Bar-sur-Seine, de Troyes, etc., dont l'altitude est bien supérieure à celle de Paris et de ses environs. Pour arriver à cette nappe, il faut traverser toute la série des terrains tertiaires, et le grand massif de la craie; les eaux du puits de Grenelle et celles du puits de Passy sont fournies par ce réservoir. Les puits si nombreux de la plaine Saint-Denis sont alimentés par la nappe aquifère des sables tertiaires.

TERRAINS NON STRATIFIÉS.

Leur disposition relativement aux terrains de sédiment. — Terrains primitifs et terrains ignés anciens. — Granit et Porphyres. — Influence des terrains ignés sur les terrains stratifiés. — Filons.

19. **Terrains ignés**. — Nous avons vu (parag. 5) que les masses minérales qui constituent la croûte solide du globe sont de deux sortes : les unes ont une origine ignée et ne présentent aucune trace de stratification, les autres ont une origine aqueuse et sont stratifiées.

Les premières ou roches plutoniques ont ce caractère commun qu'elles sont cristallines et complétement dépourvues de débris organiques; en général ce sont des silicates doubles, principalement des *feldspath*. Les principales roches primitives sont le granit et les porphyres.

20. **Granit**. — Le granit est une roche cristalline composée de feldspath, de quartz (silice) et de mica, réunis en masses granuleuses et plus ou moins agrégées. Sa dureté qui dépend principalement du quartz est très-grande. Aussi l'emploie-t-on pour les constructions qui ont besoin d'une grande solidité, pour le dallage des trottoirs par exemple. Le mica s'y montre sous forme de lamelles brillantes, tantôt noires, tantôt argentées; le quartz offre un aspect vitreux et le feldspath s'y trouve en gros cristaux blancs ou roses. Le granit que l'on emploie à Paris provient principalement d'Auvergne, de Bretagne et de Cherbourg.

Certaines roches, désignées sous le nom de *granitoïdes*, ressemblent beaucoup au granit par leur aspect et la plupart de leurs caractères, mais elles en diffèrent par la quantité relative de leurs divers éléments consti-

tutifs, par l'absence de l'un des trois principes constitutifs ou par la présence d'un minéral surajouté. Dans la *syénite*, par exemple, le mica est remplacé par de l'amphibole. Dans la *protogyne*, le mica est remplacé par du talc ; dans la *pegmatite*, le mica manque et la roche se compose de quartz et de feldspath.

21. **Disposition des roches granitoïdes relativement aux terrains de sédiment.** — Le granit paraît être la plus ancienne des formations ignées, mais l'épanchement s'en est prolongé pendant les dernières époques géologiques, on en rencontre d'âges différents. Quelquefois il se montre isolé et forme le sol de quelques pays, tels que l'Auvergne et le Limousin. Ailleurs, comme en Bretagne, il est intercalé entre des roches de sédiment.

22. **Porphyres.** — Les porphyres sont des roches ignées, composées de cristaux de feldspath englobés dans une pâte homogène de la même substance. Quelquefois on y trouve encore du mica, du quartz et de l'amphibole ; aussi distingue-t-on différentes espèces de porphyres.

Le *porphyre syénitique* est une véritable syénite à pâte compacte.

Le *porphyre rouge*, très-abondant en Égypte, se trouve aussi en France.

Le *porphyre noir*.

La *serpentine* ou *vert antique* est une pierre verdâtre, à texture compacte, composée de diallage (silicate de magnésie hydratée), d'un peu de feldspath et de talc.

Les porphyres sont des roches d'une haute antiquité ; le porphyre syénitique ne s'est épanché que pendant les premiers âges du globe. La serpentine est, au contraire, plus récente.

L'épanchement des matières qui constituent ces diverses roches d'origine ignée a donc eu lieu depuis les époques les plus reculées jusqu'à nos jours ; ces grandes éruptions ont fendu et soulevé les couches de terrains sédimentaires qui s'opposaient à leur passage et ont déterminé la formation des pics, des chaînes de montagnes et des îles.

Ces éruptions ont donc beaucoup d'analogie avec les volcans, mais, au lieu d'être très-circonscrites et de se produire par un cratère, elles se sont faites sur une grande étendue à la fois par d'immenses fentes de l'écorce solide du globe.

23. **Influence des terrains ignés sur les terrains stratifiés.** — Au moment où ces matières en fusion se sont frayées un passage, leur température était extrêmement élevée, et souvent elles ont profondément modifié les couches stratifiées qu'elles traversaient. — On désigne sous le nom de *métamorphisme* les transformations que subissent les roches dans leur constitution, sous l'influence du voisinage des roches plutoniques. C'est à la suite de ces phénomènes que certains dépôts neptuniens prennent une structure cristalline et une ressemblance très-grande avec les roches ignées. Souvent la même couche de formation aqueuse se pré-

sente avec ses caractères primitifs à une certaine distance des coulées de matières en fusion, et prend les caractères des roches métamorphiques à mesure qu'elle s'approche de ces foyers de chaleur.

C'est ainsi que s'est formé le *gneiss*, roche qui a beaucoup d'analogie avec le granit, sous le rapport de ses éléments constituants, mais qui offre toujours une disposition stratifiée; elle s'est formée probablement au sein des eaux, à l'aide de l'accumulation des particules de granit déposées et charriées par les eaux. Ce terrain paraît être le plus ancien des terrains stratifiés, car il est toujours inférieur aux autres. Au voisinage des coulées de roches ignées, les calcaires terreux et les marnes se changent en calcaires compactes, saccharoïdes ou cristallins (*fig.* 13). Les argiles sont calcinées et transformées en schistes, les matières végétales qui y étaient enfouies sont carbonisées. Les argiles schisteuses passent à l'état de schistes micacés (micaschistes) ou de schistes talqueux (talcschistes). Les grès quartzeux deviennent des quartz compactes et granulaires.



Fig. 13.
Transformation des calcaires.

24. **Terrains primitifs**. — Ce sont évidemment les couches sédimentaires les plus anciennes qui offrent le plus souvent ce genre de métamorphisme; l'action de la chaleur a fait disparaître les corps organisés qui s'y trouvaient enfouis; ce sont ces raisons tirées de leur structure cristalline, de leur âge reculé et de l'absence de fossiles qui avaient amené les géologues à les associer aux roches ignées sous le nom commun de *roches primitives*.

25. Ce ne sont pas seulement des modifications dans la structure et la constitution que les couches sédimentaires ont eue à subir, la pression que les roches ignées exerçaient sur les différentes assises qu'elles traversaient leur ont fait aussi éprouver de profonds changements; les couches ont été redressées ou diversement contournées (*fig.* 14), quelquefois même reployées plusieurs fois sur elles-mêmes. Ces soulèvements se sont faits à des époques différentes; à tous les âges du globe de grandes éruptions de matières en fusion ont eu lieu.

Un dépôt cristallin ou sédimentaire, traversé par une coulée ignée, est évidemment antérieur à celle-ci. Un dépôt sédimentaire recouvert par un dépôt igné est plus ancien que lui. Mais les choses ne se passent pas toujours d'une façon aussi nette. Quelquefois la force qui déterminait l'émission des matières en fusion a cessé d'agir avant que la coulée ait achevé de se frayer un passage à travers la totalité des couches qui lui faisaient obstacle. Dans ce cas il est difficile d'assigner un âge précis à l'éruption. D'autres fois, lorsqu'une couche très-épaisse et très-dense

s'oppose au passage des matières en fusion, celles-ci s'étendent en nappe

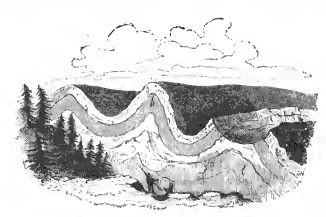


Fig. 14. — Ondulation des couches du Jura.

au-dessous d'elle, et s'intercalent ainsi entre deux formations, toutes deux plus anciennes que la roche ignée (*fig.* 15).

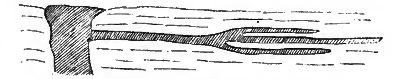


Fig. 15. — Injection de trapp entre des roches sédimentaires.

26. **Filons.** — On désigne sous le nom de ***filons*** ces sortes de coulées qui ont rempli les crevasses du sol. Les filons sont de deux sortes : les uns ne sont formés que par des roches ignées ; les seconds renferment des matières minérales.

Nous avons déjà dit un mot des premiers. Ils peuvent être constitués par de la lave, du basalte, des trapps, des porphyres ou des roches granitiques.

Les filons de laves se forment encore de nos jours, il suffit qu'une crevasse se fasse dans le cône de soulèvement pour qu'immédiatement elle soit remplie par les matières en fusion, qui s'y solidifiant, deviennent en général plus dures que le sol environnant ; de façon que celui-ci se dégrade sous l'influence des pluies, des vents, etc., et laisse le sillon en saillie, comme une espèce de mur auquel on donne le nom de ***dyke*** (*fig.* 7).

27. Le basalte qui, comme nous le savons, a été produit par les vol-

cans éteints d'une époque antérieure à la nôtre, se présente fréquemment en filons ; on en rencontre sur les bords du Rhin et dans le centre de la France. Tantôt le basalte est fendu, suivant des lignes sans régularité, d'autres fois, il est divisé en prismes perpendiculaires aux parois de la fente (*fig.* 16).

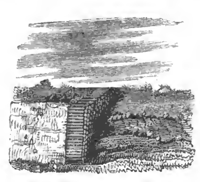


Fig. 16. — Filon de basalte.

Les trapps présentent toutes les allures des dépôts basaltiques, ils sont souvent disposés en filons, et, quand on trouve un plateau de cette roche, on peut être sûr qu'il communique avec un filon qui évidemment a amené au jour la matière alors fluide.

Les filons porphyriques se rencontrent au milieu de toutes les roches ; souvent ils en englobent des fragments pour former des conglomérats.

Le granit a été également injecté dans les crevasses du sol et il y forme des filons ; souvent aussi il enveloppe les débris des terrains qu'il traverse. En Bretagne, par exemple, le granit empâte des fragments de schistes.

28. Les filons métallifères sont des dépôts de même ordre qui remplissent des fentes et des crevasses du sol, et contiennent soit à l'état natif, soit à l'état de combinaisons, les métaux dont on se sert dans l'industrie (*fig.* 17). En général, les filons suivent les grandes lignes de dislocation de la croûte terrestre.

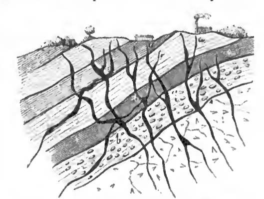


Fig. 17. — Filons dans des roches de sédiment.

Les ***amas métallifères*** ne sont que des accumulations de petits filons dirigés dans tous les sens.

Les ***gîtes métallifères*** sont des filons dont la direction est parallèle à celle des couches où ils se rencontrent.

On n'est pas encore bien fixé sur la manière dont les fentes métallifères ont été remplies. Les matières y sont arrivées le plus souvent à l'état fluide. Quelquefois elles paraissent avoir été en dissolution dans des eaux qui les ont laissé déposer, ou à l'état de vapeurs émanées de l'intérieur.

TERRAINS STRATIFIÉS.

Succession des divers dépôts de sédiment, ou terrains régulièrement stratifiés.

29. Les roches neptuniennes ayant été formées au sein des eaux, ont dû primitivement se déposer en couches horizontales, et les premières formées ont dû se trouver les plus inférieures, tandis que les plus récentes recouvraient les autres. On les désigne sous le nom de roches stratifiées, par opposition aux roches ignées ou non stratifiées. On peut, par l'examen des strates, arriver à déterminer leur âge relatif d'après leur ordre de superposition, et établir une échelle chronologique de leur dépôt.

30. **Différences de stratification.** — Dans le principe, et encore aujourd'hui sur beaucoup de points, les dépôts d'origine aqueuse se rencontrent encore en couches horizontales se recouvrant régulièrement les unes les autres (*fig.* **18**). Mais lorsqu'une éruption de roches ignées a modifié leur position, leurs assises sont plus ou moins redressées; tantôt elles ne sont que peu inclinées (*fig.* **19**), tantôt elles peuvent prendre une direction presque verticale, tantôt elles se renversent sur elles-mêmes (*fig.* **20**).

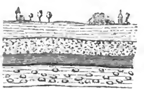


Fig. 18.

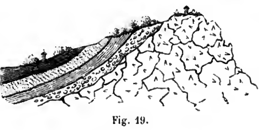


Fig. 19.

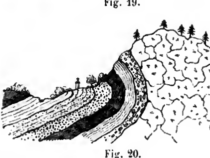


Fig. 20.

On dit que la stratification des couches est ***concordante*** lorsque ces diverses assises sont parallèles entre elles, quelles que soient d'ailleurs leur position et leur inclinaison (Voy. *fig.* **18** et **19**).

31. Lorsque la cause qui a déterminé le soulèvement ou le redressement des couches a cessé d'agir, il peut arriver que les eaux déposent de nouveaux sédiments en stratification horizontale; on dit que ces secondes couches sont en stratification ***discordante*** par

rapport aux premières (*fig.* 21). Si, à leur tour, elles viennent à être

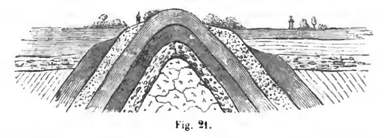


Fig. 21.

soulevées avec celles sur lesquelles elles reposent, elles cesseront d'être horizontales, mais la discordance de stratification n'en restera pas moins évidente, car il y aura toujours défaut de parallélisme entre les dépôts qui se sont formés avant et après le premier soulèvement.

Il est évident qu'entre le dépôt des lits horizontaux et celui des couches relevées il a dû se faire quelque bouleversement à la surface de la terre, quelque soulèvement dont on peut ainsi calculer l'âge relatif. Chaque ligne correspondant à une discordance de stratification correspondra donc aussi à une période de soulèvement.

Souvent les dépôts stratifiés ont été sillonnés par des cours d'eau qui les ont désagrégés, et en ont transporté ailleurs les matériaux; il a pu se former ainsi des coupures et des excavations dans des terrains anciennement déposés

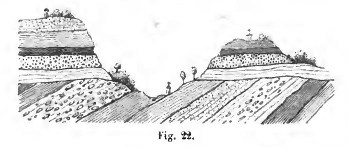


Fig. 22.

(*fig.* 22). Ces excavations ont pu ensuite être comblées par d'autres sédiments qui s'y déposent en couches horizontales.

32. **Failles.** — Il arrive quelquefois qu'à la suite d'un soulèvement le terrain se fend, et de l'un des côtés de la crevasse les couches sont plus relevées que de l'autre, de façon que les strates ne se correspondent plus (*fig.* 23). On désigne ces dispositions sous le nom de *failles*.

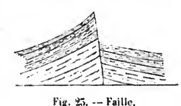


Fig. 23. — Faille.

33. Caractères tirés des restes organiques. — Ce n'est pas seulement la superposition des couches qui peut guider l'observateur dans l'étude de la constitution de notre globe, il doit étudier aussi les débris organiques contenus dans les diverses formations. En effet, la plupart des roches de sédiment renferment les débris ou les empreintes des végétaux ou des animaux qui vivaient sur la terre à l'époque du dépôt de ces couches, et, suivant les époques, la faune et la flore présentent des différences notables et souvent très-nettement tranchés. C'est ainsi que certains animaux ne se trouvent que dans certaines formations, et jamais ailleurs; ils servent donc à les distinguer, et forment des lignes de repère qu'on appelle des *horizons géologiques*.

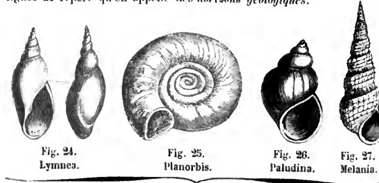


Fig. 24. Lymnea. Fig. 25. Planorbis. Fig. 26. Paludina. Fig. 27. Melania.

Coquilles d'eau douce.

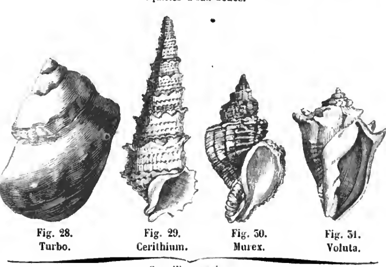


Fig. 28. Turbo. Fig. 29. Cerithium. Fig. 30. Murex. Fig. 31. Voluta.

Coquilles marines.

Enfin c'est encore l'étude des restes organiques qui permet de recon-

naître si un terrain a été formé dans des eaux douces (*fig.* 24 à 27) ou au sein de la mer (*fig.* 28 à 31).

On a donné le nom de ***paléontologie*** à l'étude comparée des êtres fossiles.

34. **Succession des divers dépôts de sédiment.** — Les couches dont se compose notre globe ont donc été formées successivement, et si l'on pouvait ouvrir une tranchée à travers l'épaisseur de l'écorce entière de la terre, on aurait sous les yeux la superposition des différents dépôts. Nous n'avons pas ce mode d'observation à nos ordres, nous ne pouvons que profiter des coupes naturelles que nous présentent certains escarpements, ou des coupes artificielles telles que celles que nous produisons, soit pour l'exploitation des carrières, soit pour le percement des routes, des puits et des mines; c'est à l'aide de ces études fractionnées que l'on est arrivé à reconnaître quel était l'ordre de superposition des couches.

35. On a divisé l'ensemble des assises de notre globe en un certain nombre de groupes :

Le premier se compose des terrains primitifs composés de roches d'origine ignée ou modifiées par le métamorphisme.

Le deuxième est formé par les terrains de transition qui établissent le passage entre les précédents et les suivants, et qui se subdivisent en un certain nombre de formations principales auxquelles on a donné les noms de terrain ***cambrien***, terrain ***silurien***, terrain ***dévonien*** et terrain ***carbonifère***. Souvent on les désigne sous le nom de ***terrains paléozoïques***, parce qu'ils renferment les débris des animaux qui peuplaient la surface du globe pendant les premières périodes géologiques.

Le troisième groupe, qui vient au-dessus, porte le nom général de terrain secondaire subdivisé en terrains ***permien***, ***triasique***, ***jurassique***, et ***crétacé***.

Le quatrième, ou groupe de terrains tertiaires, se subdivise en terrains ***éocène***, ***miocène*** et ***phocène***.

Le cinquième est le plus récent et porte le nom de terrain ***quaternaire***. Le tableau suivant indique l'ordre de succession des principaux dépôts sédimentaires.

TABLEAU DES DÉPÔTS SÉDIMENTAIRES PRINCIPAUX

Dépôts	Terrains	Groupes
	Alluvions modernes. Diluvium	Terrain quaternaire.
Dépôts de la Bresse, collines subapennines.	Terrain subapennin	Terrains tertiaires.
Faluns, molasse, gypse d'Aix	Terrain de molasse..	
Gypse parisien, calcaire grossier, argile.	Terrain parisien.	
Craie blanche.	Terrain crétacé supérieur.	Terr. secondaires.
Craie marneuse.		
Craie tuffeau.	Terrain crétacé inférieur. .	
Craie verte.		
Grès vert.		
Dépôts néocomiens.		
Groupe portlandien.	Terrain jurassique.	
Groupe corallien.		
Groupe oxfordien.		
Groupe oolitique.		
Lias.		
Marnes irisées.	Terrain de trias.	
Calcaire conchylien.		
Grès bigarré.		
Grès vosgien.	Terrain permien.	
Calcaire permien.		
Grès rouge.		
Grès houiller.		
Calcaire carbonifère, vieux grès rouge, grès divers.	Terrain dévonien.	Terr. de transition.
Calcaires et schistes micacés.	Terrain silurien..	
Schistes micacés, calcaires, gneiss.	Terrain cambrien.	
	Matières inconnues, peut-être primitives.	

TERRAINS PRIMAIRES INFÉRIEURS.

36. Anciennement ces terrains étaient confondus avec les terrains primitifs d'origine ignée, mais on a reconnu depuis qu'ils étaient d'origine aqueuse, et que leur structure cristalline était due au métamorphisme.

Les dépôts de gneiss, de micaschiste et de talcschiste paraissent s'être formés à cette époque. On ne rencontre dans cette formation aucun corps organisé ; on est donc en droit de supposer qu'à l'époque où elle s'est déposée il n'existait aucun être vivant à la surface de la terre, ou bien que les fossiles ont été détruits par la chaleur résultant du voisinage d'énormes masses de roches ignées. Tous les terrains primaires ne sont pas du même âge ; on a pu reconnaître que les gneiss avaient été déposés avant les micaschistes, et que ceux-ci étaient recouverts par les schistes argileux.

Ces différentes roches constituent à elles seules une grande partie de la surface du globe ; elles présentent quelquefois les traces de grands bouleversements, et les couches qui les composent sont alors plus ou moins contournées et fracturées. Les principales chaînes de montagnes sont en grande partie principalement formées par des terrains anciens, bien que leur soulèvement ait eu lieu à des époques moins reculées.

En France, dans le plateau central, et en Auvergne, on rencontre du granit associé à du gneiss et à d'autres roches primaires recouvertes elles-mêmes de sédiments plus récents. L'axe de la chaîne des Alpes, des Pyrénées, des Grampians, en Écosse, des monts Ourals, en Russie, des Andes, en Amérique, est également formé de roches anciennes.

TERRAIN CAMBRIEN.

37. Le terrain cambrien est caractérisé par sa position au-dessus des roches précédentes et au-dessous de tous les autres terrains stratifiés. C'est la première assise dans laquelle on rencontre des corps organisés fossiles.

Ce terrain se trouve en Angleterre, où on l'a observé pour la première fois ; en France, on en connaît quelques dépôts. En Amérique, le cambrien forme une masse considérable dans l'État de New-York ; on le retrouve également dans le Canada et dans le Vermont.

Les roches qui constituent ce terrain ont en général une structure schisteuse. Les schistes sont de couleur foncée, soit noire ou verdâtre ou bleue. On y rencontre aussi des grès.

38. Les restes d'animaux que l'on trouve dans les assises du terrain cambrien se rapportent aux zoophytes, aux mollusques et aux crustacés.

Les zoophytes sont des polypiers, des encrines, espèce d'échinodermes, qui ressemblent à des étoiles de mer dont le corps serait porté par une tige qui s'attacherait à son centre et serait fixée au sol.

On y trouve aussi des graphtolithes, animaux agrégés qui paraissent appartenir à la classe des polypes et dont l'empreinte ressemble à une barbe de plume (*fig.* 32).



Fig. 32. — Graphtolithe.

Les crustacés dont on trouve les débris doivent se placer entre les isopodes et les branchiopodes ; depuis longtemps ils ont disparu de la surface du globe. Les animaux aujourd'hui vivants dont ils se rapprochent le plus sont les apus et les cloportes, dont ils dépassaient de beaucoup les dimensions, puisqu'on en a trouvé qui avaient plus d'un pied de long ; de même que les cloportes, ils jouissaient de la propriété de se rouler en boule, et, de même que les apus, ils n'avaient que des pattes membraneuses en forme de rames. Ces animaux ont le corps composé d'une série d'anneaux (*fig.* 33), et présentent une tête, un thorax et un abdomen. Le thorax est divisé par deux sillons longitudinaux en trois lobes, dont un médian ou dorsal, et deux latéraux connus sous le nom de flancs. Cette division a fait donner à ces animaux le nom de *trilobites*.

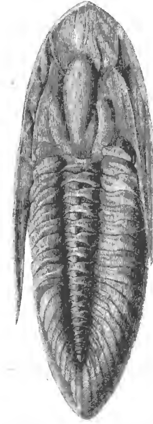


Fig. 33. — Crustacé trilobite. (*Ogygia Guettardi.*)

TERRAIN SILURIEN.

39. Le terrain silurien [1] repose sur les assises supérieures de la formation précédente. Sa puissance est considérable, elle peut aller sur certains points jusqu'à deux mille mètres, mais en général elle ne dépasse pas cinq cents mètres d'épaisseur.

Les couches du terrain silurien reposent sur celles du terrain cambrien en stratification discordante. Elles consistent principalement en schistes et en roches calcaires ; sur certains points on y trouve des grès.

[1] Ainsi appelé du nom d'une petite peuplade celtique (les Silures) qui habitaient une partie de l'Angleterre, où se rencontre le terrain silurien.

A cette époque, la mer occupait la plus grande partie de la surface du globe, car on ne connaît encore aucune trace de végétal ou d'animal ayant vécu alors dans les eaux douces ou sur la terre.

Le terrain silurien est bien développé en Angleterre, où M. Murchison l'a fait connaître, et en Bohême, où les travaux de M. Barrande l'ont rendu célèbre.

40. **Ardoises**. — En France, on rencontre ce terrain aux environs d'Angers, où il est représenté par des ***schistes ardoisiers*** que l'on exploite pour la toiture des maisons et d'autres usages, entre Avrillé et Trelazé, sur une longueur d'environ deux lieues, et sur certains points l'exploitation se fait à ciel ouvert.

41. **Fossiles.** — Les couches du terrain silurien sont riches en fossiles ; on y trouve des empreintes de végétaux appartenant pour la plupart à la famille des fucus et un grand nombre d'animaux marins. Des polypiers (*fig.* 34) et des éponges appartenant à des genres qui ont




Fig. 34. — *Cyatophyllum Turbinatum.*


Fig. 35. — *Orthis orbicularis.*

aujourd'hui disparu ; les encrines y sont abondantes. De nombreux mollusques y ont laissé leurs dépouilles. Les uns sont bivalves et appartiennent à la division des ***brachiopodes***. Tels sont les ***spirifères*** et les ***orthis*** (*fig.* 35).

Les autres sont univalves et se rapprochent de nos céphalopodes vivants et particulièrement des nautiles (mollusque remarquable par la légèreté de sa coquille spirale enroulée sur le même plan). Ainsi on peut regarder les ***lituites*** (*fig.* 36) comme des nautiles dont les tours de spire de la coquille seraient desserrés, et les ***Orthocères*** (*fig.* 37) comme des nautiles à coquille complétement déroulée et dont la spire serait redressée.

Les singuliers crustacés dont nous avons parlé plus haut sous le nom de trilobites sont extrêmement abondants, et leurs espèces varient suivant



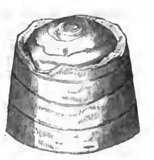




Fig. 36. — *Lithuites Cornuarietis.*

Fig. 37 —. *Orthoceras conica.*

les différentes couches siluriennes que l'on examine. Ainsi, une espèce, le *trinucleus Pongerardi* (*fig.* 38) ne se rencontre que dans les assises inférieures, tandis qu'une autre, la *calymène Blumenbachi* (*fig.* 39) est propre aux couches supérieures.

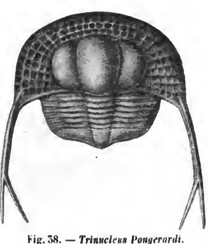


Fig. 38. — *Trinucleus Pongerardi.*

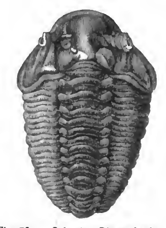


Fig. 39. — *Calymène Blumenbachii.*

Les empreintes que les trilobites ont laissées sont quelquefois tellement parfaites que l'on a pu étudier d'une façon complète beaucoup de parties de leur organisation extérieure. On a été jusqu'à compter le nombre de leurs facettes oculaires ; on a pu observer leurs œufs et suivre toutes les

phases de leur développement et la manière dont apparaissaient leurs différents articles. Jamais on n'a retrouvé les traces de leurs pattes ou des appendices qui leur en tenaient lieu, et il est probable que ces parties étaient membraneuses et ont disparu en se fossilisant.

TERRAIN DÉVONIEN.

42. Le terrain dévonien repose en stratification discordante sur le silurien. A sa partie inférieure se trouvent des poudingues qui alternent à diverses reprises avec des grès schisteux auxquels leur couleur rouge et leur position ont fait donner le nom de ***vieux grès rouge*** (*Old red sandstone* en Angleterre). Dans cette assise on rencontre des débris de roches siluriennes roulées et brisées par l'action des eaux.

Au-dessus du vieux grès rouge se trouvent des grès schisteux et des calcaires entre lesquels on observe des couches d'***anthracite***, qui ont fait donner à ce terrain le nom de terrain ***anthracifère***.

Cet anthracite, formé aux dépens des matières végétales qui existaient alors, forme le combustible charbonneux le plus ancien que l'on connaisse ; sur certains points, il constitue une véritable ***houille***, que l'on exploite dans les environs d'Angers. Les mines de charbon de terre de Montrelais, de Saint-Georges, de Chatelaison, appartiennent à cette période. Le terrain dévonien se trouve en France, en Bretagne, le long de la Loire, dans la Mayenne et la Sarthe ; on le rencontre dans la Belgique, le Hartz, la Saxe, l'Angleterre, la Suède, la Russie, l'Asie, l'Amérique. Les grès dominent en Angleterre, où ils forment des couches d'une grande puissance.

43. Les fossiles du terrain dévonien sont moins nombreux que ceux du silurien. On y rencontre des tribolites, mais en moindre abondance que dans les formations précédentes, et les espèces en sont différentes.

Les tribolites ne sont pas les seuls représentants de la classe des crustacés que l'on trouve dans ce terrain. Il en existe un de la taille de nos plus grands crabes, et se rapprochant des limules qui habitent les eaux saumâtres des pays chauds.

Les mollusques y sont très-abondants. Ce sont encore des céphalopodes voisins des nautiles, des orthocères ou des brachiopodes bivalves dont une espèce, la ***calceola sandalina*** (***fig.*** **40**), est remarquable par sa forme de soulier, et caractérise par sa fixité et son abondance les couches de cette époque. Cette coquille est analogue aux spirifères dont nous avons indiqué la pré-

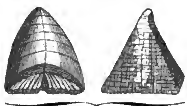


Fig. 40. — *Calceola sandalina.*

sence dans les assises siluriennes ; d'ailleurs on trouve encore dans le dévonien quelques espèces de ce dernier genre.

On a découvert dans ce terrain des poissons (*fig.* 41) très-singuliers,

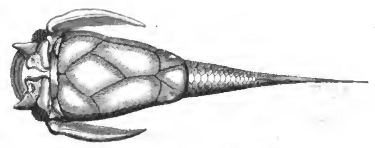


Fig. 41. — *Pterichthys cornutus.*

qui, par leur forme, s'éloignent de tous les types connus. L'un d'eux est le *pterichthys*, qui porte de chaque côté du corps, à la partie antérieure, des sortes de nageoires pointues, et dont la queue se termine en pointe.

C'est dans cette formation que l'on a rencontré le plus ancien reptile connu. Il est intermédiaire entre les batraciens et les iguanes. C'est le seul animal terrestre ou d'eau douce que l'on connaisse encore.

Les plantes devaient être très-abondantes, si l'on en juge par l'épaisseur des dépôts d'anthracite et de houille auxquels elles ont donné naissance.

TERRAIN HOUILLER.

44. **Disposition et fossiles du terrain houiller**. — Le terrain houiller, qui vient au-dessus du dévonien, doit son nom à la richesse des couches de houille qu'il renferme.

Ce combustible se rencontre en stratification alternante avec des grès, des schistes et des calcaires. La houille prise à part ne forme qu'une portion insignifiante de la masse totale des terrains houillers. Ainsi, dans le nord de l'Angleterre, l'épaisseur des couches carbonifères atteint plus de neuf cents mètres, et les couches de combustible, au nombre de vingt ou de trente ne dépassent pas ensemble vingt-cinq mètres.

La partie inférieure du terrain houiller est formée par un calcaire bleuâtre ne renfermant que peu ou pas de combustible, on le nomme *calcaire carbonifère* ; il a été formé au sein de la mer et renferme beaucoup de fossiles marins,

45. Les tribolites, si nombreux à l'époque cambrienne, silurienne et dévonienne, se montrent encore, mais ils tendent à disparaître et ne sont plus représentés que par deux genres qui ne dépasseront pas l'époque carbo-

nifère. En effet, cette singulière famille de crustacés ne se montre pas dans les terrains supérieurs à celui qui nous occupe et sont propres aux formations les plus anciennes que nous avons indiquées sous le nom commun de terrains paléozoïques.

Les mollusques sont très-nombreux. Les céphalopodes y sont représentés par diverses espèces d'orthoceras, par des *goniatites*, sortes de nautiles à cloisons anguleuses (*fig.* 42), par des *évomphales*, dont la coquille est cloisonnée et divisée ainsi en chambres dont le nombre est variable (*fig.* 43), par des *bellérophons*, qui se rapprochent jusqu'à un certain point de l'argonaute actuel, en ce que

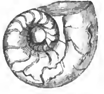


Fig. 42.
Goniatites Evolutus.

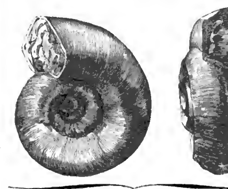




Fig. 43. — *Evomphalus Pentangulatus.*



Fig. 44.
Bellerophon Costatus.

leurs coquilles ne sont pas cloisonnées (*fig.* 44). Les mollusques bivalves sont assez nombreux.

Au-dessus du calcaire carbonifère se trouvent des couches de grès alternant avec des lits de houille.

46. **Origine de la houille.** — Cette matière, appelée communément charbon de terre, résulte de la décomposition lente des végétaux qui, à cette époque, couvraient la terre. Tantôt la houille paraît avoir été formée sur place, c'est-à-dire dans les endroits mêmes où croissaient les arbres et où s'accumulaient leurs débris ; tantôt ces dépôts ont été accumulés par l'action des eaux qui charriaient les matières végétales.

On est conduit à la première de ces hypothèses par l'examen de certains lits de houille dans lesquels on retrouve en place des arbres entiers avec leurs racines, entre lesquelles sont encore les fruits et les écailles tombées. Sur d'autres points, et c'est le cas le plus fréquent, les matières végétales paraissent avoir été évidemment transportées par des cours d'eau. En effet, on y trouve bien des troncs d'arbres, mais presque tou-

jours brisés ; quand les racines existent, elles sont souvent en haut et se trouvent distribuées à des niveaux différents. La pureté de la houille, l'absence des particules sableuses et de graviers dans sa masse, s'expliqueraient difficilement si on voulait admettre les couches de combustible comme résultant de la végétation développée dans un marécage.

Dans la plupart des cas, les eaux ont entraîné les troncs d'arbre et les différents débris végétaux et les ont accumulés en masse dans des lacs, des golfes ou aux embouchures des rivières ; les arbres, après avoir flotté quelque temps, ont coulé au fond, et c'est ainsi que lentement et successivement se sont formés ces dépôts de matières végétales qui, sous l'action simultanée du temps et de la pression, se sont transformées en houille. — De nos jours, certains fleuves, le Mississipi, par exemple, entraîne dans son cours une quantité considérable d'arbres qu'il accumule ensuite à son embouchure ; il se prépare ainsi pour l'avenir de nouvelles couches de combustible, d'une puissance bien petite, si on la compare à ce qui a eu lieu à l'époque houillère, où toutes les circonstances étaient réunies pour permettre le développement d'une végétation luxuriante et gigantesque, où l'air chargé d'acide carbonique était saturé d'humidité, et où la température élevée fournissait aux végétaux les conditions qu'ils ne trouvent aujourd'hui que dans les régions tropicales.

47. **Flore de l'époque de la houille.** — Les végétaux qui couvraient alors la surface de la terre différaient beaucoup de ceux qui existent aujourd'hui ; c'étaient surtout des acotylédones et des conifères.

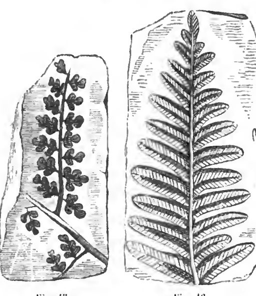


Fig. 45. *Pecopteris aquilina.*

Fig. 46. *Sphenopteris Heningausi.*

Les fougères, les lycopodiacées, les équisétacées, les sigillariées, qui aujourd'hui n'atteignent jamais à de grandes dimensions, présentaient alors une taille gigantesque.

On a extrait des couches du terrain houiller plus de deux cent cinquante

espèces de fougères, et aujourd'hui, en Europe, il n'en existe que soixante vivantes de la même tribu. Les feuilles des espèces houillères offrent

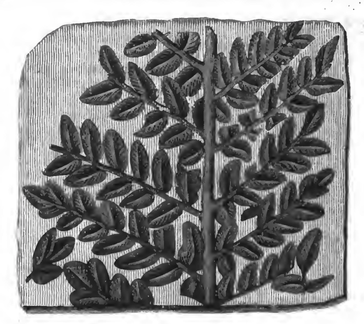


Fig. 47. — *Nevropteris heterophylla.*

une grande analogie de formes avec celles qui vivent encore. Les principales espèces se rapportent aux genres *pecopteris* (*fig.* 45), *sphenopteris* (*fig.* 46) et *nevropteris* (*fig.* 47).

Les lycopodiacées, qui aujourd'hui ne sont plus que de petites herbes, formaient alors des arbres de plus de vingt mètres de hauteur (*fig.* 48). On en a retrouvé des troncs entiers présentant très-distinctement les cicatrices des feuilles tombées et disposées en spirales.

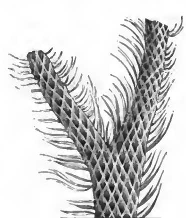


Fig. 48.
Lepidodendron elegans.

Les sigillariées s'élevaient parfois aussi à plus de vingt mètres; leur tige était cannelée, cylindrique, régulière, et présentait de nom-

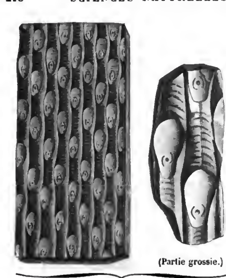


Fig. 49. — *Sigillaria Græseri.*

breuses cicatrices, traces des feuilles tombées (*fig.* 49).

Les stigmaria, qui pendant longtemps ont été regardées comme des plantes distinctes, ne sont que les racines des sigillaria.

Les plantes de la famille des conifères se rapprochent des araucaria actuels. A côté du tronc on trouve souvent leurs fruits ou cônes.

Dans les schistes argileux intermédiaires aux couches de houille, on rencontre de nombreux poissons dont quelques-uns paraissent se rapporter à la famille des squales; d'autres s'éloignent par leur organisation des types vivants et se rapprochent jusqu'à un certain point des reptiles sauriens. On connaît aussi dans le terrain houiller de véritables reptiles connus sous le nom d'*archægosaurus*, dont quelques-uns avaient plus d'un mètre de long.

Des mollusques acéphales du genre unio et de petits entomostracés vivaient dans les ruisseaux qui coulaient alors. A côté des empreintes de feuilles se trouvent parfois celles de divers insectes.

On désigne sous le nom de *coke* la houille que l'on a fait chauffer à l'abri de l'air, ou brûler incomplètement de manière à en chasser une huile empyreumatique et des gaz inflammables.

48. Étendue du terrain houiller. — Le terrain houiller ne peut se rencontrer qu'à la limite des terrains plus anciens ou au-dessous d'eux, et il faut les traverser pour y arriver; aussi l'étendue des dépôts houillers est-elle peu considérable à la surface du globe. En Angleterre et en Belgique, ils sont relativement très-puissants et très-étendus. En France, ils forment environ $\frac{1}{200}$ de la surface du sol, et sont pour la plupart réunis autour du plateau central, qui renferme le Morvan, le Bourbonnais, l'Auvergne et le Limousin, ou disséminés à sa surface; ils s'étendent depuis les rives du Rhône jusque dans la vallée de la Haute-Vienne, et reposent directement sur les roches granitiques ou métamorphiques des terrains anciens. Les principales exploitations de houille de cette région centrale sont celles de Saint-Étienne et de Rive-de-Gier, près de Lyon; d'Alais, dans le département du Gard; de Décazeville, dans le dé-

partement de l'Aveyron, et de Saint-Bérain, dans le département de Saône-et-Loire.

Un riche dépôt de houille qui s'étend entre Liége et Valenciennes repose sur le calcaire carbonifère et sur le vieux grès rouge. Il se continue jusque dans le Boulonnais; il existe aussi des houillères importantes dans le département de la Moselle, dans l'Alsace et dans le département de la Haute-Saône; enfin il s'en trouve quelques-unes, mais peu considérables, dans le département de l'Aude et du Var, ainsi que dans quelques autres parties de la France.

Un coup d'œil jeté sur la carte des dépôts houillers (*fig.* 50) en fera d'ailleurs comprendre la disposition générale.

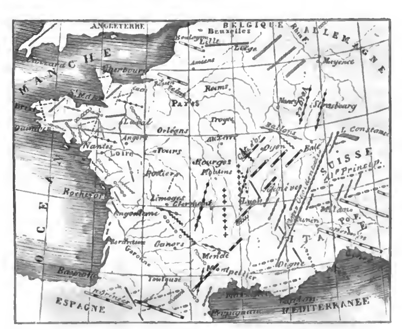


Fig. 50. — Carte des dépôts houillers de la France.

TERRAIN PERMIEN.

49. Les couches du terrain permien reposent en stratification discordante sur celles du terrain carbonifère. Ses assises les plus inférieures sont formées par un grès de couleur rougeâtre, connu des géologues sous le nom de ***nouveau grès rouge***, par opposition au ***vieux grès rouge*** du terrain dévonien.

Au-dessus viennent des ***schistes bitumineux*** très-remarquables par les

minerais de cuivre qu'ils présentent sur certains points, et particulièrement en Thuringe.

Sur les schistes reposent des assises de calcaire compacte qui, quelquefois, sont d'une épaisseur considérable et contiennent une quantité notable de magnésie, ce qui leur a fait donner le nom de ***calcaires magnésiens***.

Au-dessus se trouvent des grès désignés sous le nom de ***grès Vosgiens***, à raison de la localité où ils sont le plus développés. En effet, cette formation constitue toute la partie septentrionale des Vosges (*fig.* 52).

Ces grès ont, en général, une couleur rouge brique; leur épaisseur atteint quelquefois 500 mètres.

50. En France, le terrain permien n'est guère représenté que par les grès vosgiens.

En Angleterre, le nouveau grès rouge est bien développé, il en est de même en Thuringe.

En Allemagne, les schistes bitumineux et cuivreux se présentent sur une surface considérable, recouverts par du calcaire magnésien. Les grès se prolongent dans toutes les parties orientales de la Russie.

51. On trouve dans les couches du terrain permien des débris de reptiles sauriens analogues aux iguanes et aux monitors qui vivent encore aujourd'hui. On y rencontre aussi des poissons très-nombreux dans les lits de schistes cuivreux; probablement ils ont été détruits subitement par des émanations sulfureuses. Ces animaux se rapportent surtout au groupe des ***hétérocerques*** caractérisés par le prolongement de la colonne vertébrale dans le lobe supérieur de la queue.

A cette époque, les mers étaient aussi habitées par des mollusques. Quelques espèces de spirifères et de productus (*fig.* 52) sont caractéristiques de cette période.

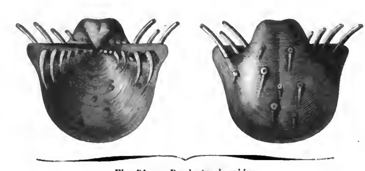


Fig. 51. — ***Productus horridus.***

Dans les roches permiennes de Saxe, on trouve de nombreux débris végétaux appartenant au moins à soixante espèces de plantes fossiles, sur

lesquelles quarante n'ont pas été rencontrées ailleurs. Quelques-unes sont communes au terrain houiller.

TERRAIN DE TRIAS OU SALIFÈRE.

52. Le terrain de trias tire son nom des trois groupes d'assises qui le composent. En effet, on trouve de bas en haut le *grès bigarré*, le *calcaire conchylien* ou *muschelkalk* et les *marnes irisées*.



Fig. 52.

53. **Grès bigarrés.** — Les grès bigarrés reposent en stratification discordante sur le grès vosgien. Ces grès sont, comme leur nom l'indique,

de couleurs assez vives, et mêlés à de nombreuses paillettes de mica; tantôt ils sont rouge foncé, tantôt gris, tantôt tachés de jaune. Ces assises apparaissent sur presque tout le pourtour des Vosges, sur la pente des montagnes de l'Aveyron, des Cévennes et des Pyrénées (*fig.* 52). On les retrouve en Angleterre et en Allemagne.

54. **Calcaire conchylien.** — Le calcaire conchylien, ou muschelkalk des Allemands, se confond d'abord avec le précédent; en effet, on voit d'abord les lits de grès alterner avec des lits de calcaire qui deviennent de plus en plus épais et finissent par former toute la masse. Ces calcaires sont compactes, grisâtres, verdâtres ou jaunâtres, souvent ils sont magnésiens. On les voit reposer sur les grès bigarrés sur quelques points, au pied des Vosges.

55. **Marnes irisées.** — Les marnes irisées, que l'on connaît aussi sous le nom de *marnes du Keuper*, sont composées d'une manière très-variable de couches de marnes plus ou moins calcaires alternant avec des couches d'une argile d'un rouge lie de vin, quelquefois bleuâtre ou verdâtre, et dont les couleurs lui ont fait donner son nom.

56. **Sel gemme et gypse.** — C'est dans cette assise que se trouvaient les dépôts de *sel gemme* exploités en Lorraine, et qui ont quelquefois fait désigner le trias sous le nom de *terrain salifère.*

Les mines de sel de Vic font partie de ce dépôt. Les sources salifères du Jura, de l'Allemagne et de l'Angleterre doivent leur richesse aux couches salifères que les cours d'eau ont traversées avant d'arriver au jour.

Les masses de sel gemme sont souvent accompagnées de gypse ou pierre à plâtre (sulfate de chaux hydraté). Quelquefois ces derniers dépôts se rencontrent seuls; ils sont exploités sur certains points du midi de la France.

57. En Angleterre, les marnes irisées existent ainsi que les grès bigarrés, mais le calcaire conchylien manque. On désigne l'ensemble de cette formation sous le nom de *nouveau grès rouge supérieur.* En Amérique, ces assises présentent un développement considérable.

58. **Fossiles du trias.** — A l'époque triasique, une puissante végétation couvrait la terre qui était habitée, ainsi que les mers, par de nombreux animaux.

C'est dans ce terrain que l'on a trouvé le premier mammifère qui, jusqu'ici, paraît s'être montré à la surface du globe. On en découvrit quelques dents dans le Wurtemberg, et on lui donna le nom de *microlestes* (de *μίκρος*, petit, et *λῃστής*, bête de proie). Bien que le microlestes soit le premier mammifère que l'on connaisse, il ne faut pas en conclure que ce soit seulement à cette époque que cette classe ait été créée; peut-être existait-elle longtemps avant, et peut être en découvrira-t-on un jour des représentants.

On a cru longtemps que les mammifères caractérisaient l'époque ter-

tiaire, mais bientôt on en découvrit de l'époque jurassique. Aujourd'hui on en a trouvé dans le trias. Il faut donc bien se garder d'établir des lois sur les créations successives des animaux à la surface de la terre, quand la découverte inattendue d'une dent peut venir les renverser.

On a trouvé sur un grand nombre de points, principalement en Amérique et en Angleterre, des empreintes de pas (*fig.* 53) que des oiseaux

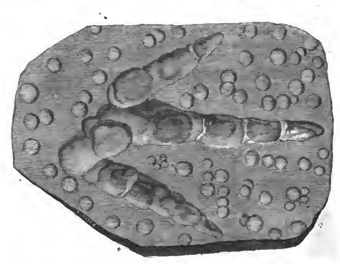


Fig. 53. — Empreintes de pied d'oiseau et de gouttes de pluie.

avaient laissées en marchant sur un sol argileux qui, sous l'influence du temps, s'était durci et transformé en schistes. A en juger par la grandeur du pied et la longueur des enjambées, ces oiseaux devaient dépasser de beaucoup la taille de l'autruche. Quelquefois les orteils ont jusqu'à 50 centimètres de long.



Fig. 54.
Empreinte d'un pied de Labyrinthodon.

A côté de ces traces d'oiseau, on a remarqué des empreintes (*fig.* 54) laissées par un grand batracien, le labyrinthodon (*fig.* 55).

Le calcaire conchylien renferme une grande quantité de coquilles dont

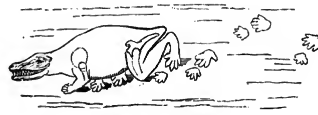


Fig. 55. — Labyrinthodon.

quelques-unes sont caractéristiques. Tels sont le *ceratites nodosus* (*fig.* 56), coquille de mollusque céphalopode analogue à nos nautiles, mais dont les cloisons seraient onduleuses; l'*avicula socialis*, petite coquille bivalve (*fig.* 57) qui se rencontre en quantités considérables. C'est dans cette formation que se montre, pour la première fois, le genre *trigonie*, qui vit encore aujourd'hui.

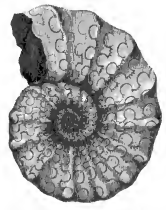


Fig. 56. — *Ceratites nodosus.*



Fig. 57. — *Avicula socialis.*

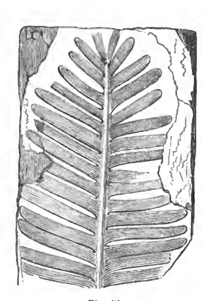


Fig. 58.
Pterophyllum Pleiningeri.

De nombreux végétaux ont laissé leurs empreintes dans les marnes irisées; ce sont des conifères, des cycadées (*fig.* 58) et quelques calamites.

TERRAIN JURASSIQUE.

59. Au-dessus des terrains salifères se sont déposées les couches du *terrain jurassique*, ainsi nommé parce que c'est d'abord dans les montagnes du Jura qu'il a été l'objet, en France, d'une étude sérieuse.

Cet ensemble de couches peût se subdiviser en un certain nombre de groupes.

A la partie inférieure se trouve le *lias* et au-dessus les calcaires *oolithiques*, qui se subdivisent eux-mêmes en quatre groupes secondaires.

60. **Lias.** — Le lias est lui-même formé de trois parties : la première, qui tantôt repose sur le trias, tantôt sur le granit ou les terrains anciens, est constituée par des couches d'un grès quelquefois très-peu cohérent. Elles renferment de nombreux dépôts métallifères, de l'oxyde de manganèse, de l'oxyde de chrome. Ces assises portent le nom de grès *infra-liasique*.

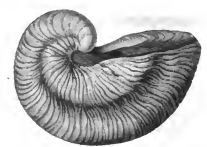


Fig. 59. — Gryphée arquée.

Au-dessus viennent des calcaires peu compactes, très-riches en fossiles, l'un d'eux y est particulièrement abondant. C'est une coquille bivalve, de la famille des huîtres, qui, à raison de sa forme, porte le nom de *gryphée arquée* (*fig.* 59).

61. Ces calcaires appelès *calcaires à gryphées* sont recouverts par des marnes schisteuses ou argileuses très-riches en débris organiques ; on y trouve beaucoup de *bélemnites*.

Les bélemnites (*fig.* 60), que nous voyons paraître à l'époque secondaire, étaient des mollusques céphalopodes analogues à nos poulpes, à nos calmars, et qui, de même

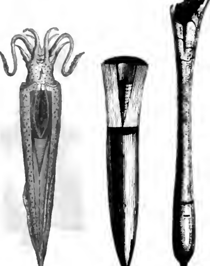


Fig. 60. Restauration d'une Bélemnite. Fig. 61. *Belemnites sulcatus.* Fig. 62. *Belemnites pistiliformis.*

que ces derniers, portaient sous leurs téguments une coquille styliforme, à laquelle on applique le nom de bélemnite (*fig.* 61 et 62), qui servait de soutien à leurs téguments. Cette partie dure et résistante s'est seule conservée, le reste de l'animal a disparu. Aussi pendant longtemps ne s'est-on pas rendu compte de la nature des bélemnites, jusqu'à ce que l'on ait trouvé sur des plaques de calcaire l'empreinte entière de l'animal, pourvu de ses longs tentacules préhenseurs, et présentant sur la partie dorsale son osselet protecteur.

Dans toutes les autres couches de la période secondaire que nous allons passer en revue, nous trouverons des bélemnites, et ces corps sont d'un grand secours pour la détermination des terrains, car leurs formes, variant suivant les diverses couches, elles peuvent, par conséquent, former de bons horizons géologiques.

A cette époque vivaient en grand nombre d'autres céphalopodes qui se sont montrés et ont disparu avec la période secondaire; ce sont les *ammonites*. De même que les nautiles, elles ont des coquilles enroulées sur elles-mêmes et divisées en un certain nombre de chambres que traverse un conduit appelé siphon. Les cloisons qui séparent les chambres, au lieu d'être régulièrement courbes, sont très-onduleuses (*fig.* 63).



Fig. 63. — *Ammonites Walcoti.*

Dans le lias on rencontre également de nombreux restes de reptiles sauriens dont nous ne connaissons aucun analogue dans la nature actuelle. Leur ostéologie rappelle à la fois les lézards les crocodiles et les poissons.

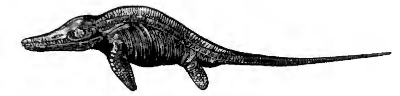


Fig. 64. — Ichthyosaure.

Les *ichthyosaures* (*fig.* 64), par exemple, ont le museau et l'aspect général d'un marsouin, et au premier abord ils semblent avoir la tête d'un

lézard, les dents d'un crocodile, les vertèbres d'un poisson, les nageoires d'une baleine. Le nombre et la forme de leurs dents en faisaient des animaux redoutables.

Les *plésiosaures* (*fig.* 65) étaient remarquables par la longueur démesurée de leur cou, ressemblant à un corps de serpent, et composé quelquefois de trente-trois vertèbres. Leurs nageoires étaient construites sur le même type que chez l'espèce précédente. Ce devait être un animal aquatique marin. La longueur de son cou pouvait lui permettre de saisir de loin sa proie.

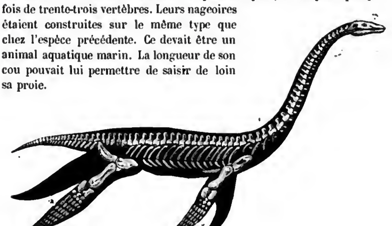


Fig. 65. — Plésiosaure.

Les *ptérodactyles* (*fig.* 66), offrent des rapports de formes avec les reptiles et les chauves-souris ; en effet, ces reptiles étaient pourvus d'ailes qui leur permettaient de se soutenir dans les airs. Ces ailes étaient formées par un repli de la peau des flancs, qui s'étendait de l'un des doigts, très-allongé à cet effet, jusqu'au membre postérieur.



Fig. 66. — Ptérodactyle.

62. **Système oolithique**. — Les couches qui composent ce système doivent se subdiviser en quatre étages :

L'étage de la grande oolithe, l'étage de l'argile d'Oxford, l'étage corallien et et l'étage portlandien.

L'*étage de la grande oolithe* commence ordinairement par une couche de sable jaune et micacé, alternant avec des argiles ; puis viennent des calcaires formés par la réunion de petits grains appelés *oolithes*, que l'on exploite aux environs de Caen.

Dans les couches inférieures, on trouve une espèce de gryphée, voisine de celle que nous avons déjà signalée dans le lias, mais qui s'en distingue par sa forme moins arquée, c'est le *gryphea cymbium*. On y rencontre aussi des *térébratules* (*fig.* 67), des espèces d'*ammonites* (*fig.* 68) distinctes de celles des autres étages, etc.



Fig. 67. — *Terebratula globata.*

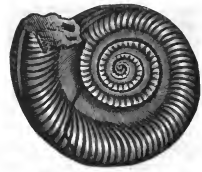


Fig. 68. — *Ammonites striatulus*

On a trouvé en Angleterre, dans les marnes de Stonesfield, qui ont été déposées pendant cette période, les restes de nombreux mammifères marsupiaux (*fig.* 69).



Fig. 69. — *Didelphus Bucklandi.*

On connaît aussi quelques végétaux de cette époque et différents de ceux des autres couches.

63. **Étage oxfordien**. — Cet étage est formé par une couche puissante d'une argile bleue appelée, à raison des localités où on la connaît le mieux, *argile de Dives*, en France, et *Oxford-clay*, en Angleterre. Cette

couche est très-riche en fossiles; ce sont surtout des *bélemnites* et des *ammonites* (*fig.* 70); — une espèce d'huître, l'*ostrea dilatata* (*fig.* 71), est caractéristique de cette époque.

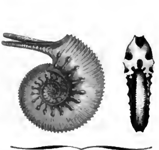


Fig. 70. — *Ammonites Jason.*



Fig. 71. — *Ostrea dilatata.*

64. **Étage corallien.** — Ce groupe est ainsi nommé à cause du nombre de polypiers fossiles que l'on y rencontre. — Les Anglais lui donnent le nom de *coral rag*. Il est également bien développé en Normandie. On rencontre dans cet étage une coquille bivalve caractéristique de cet horizon, c'est le *diceras arietina* (*fig.* 72).

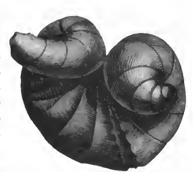


Fig. 72. — *Diceras arietina.*

65. **L'étage portlandien** se compose de deux assises principales: l'une est argileuse et porte le nom d'argile de Kimmeridge ou de Honfleur; l'autre est calcaire; sa structure est tantôt grenue, tantôt compacte; elle est désignée sous le nom de calcaire de Portland. Elle manque en Normandie.

Les fossiles de cet étage sont abondants; deux espèces d'huîtres : l'*ostrea deltoïdea* (*fig.* 73) et l'*exogyra virgula* (*fig.* 74), sont

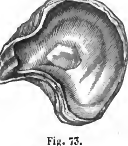


Fig. 73.
Ostrea deltoïdea.



Fig. 74.
Exogyra virgula

caractéristiques du portlandien. On y trouve aussi des *térébratules*, des *ammonites*, etc

66. Les dépôts jurassiques sont très-développés en France (*fig.* 75). Une large bande s'étend des bords de l'Océan, vers la Rochelle, jusqu'à Luxembourg et Mézières; il s'y rattache une bande qui se détache de la

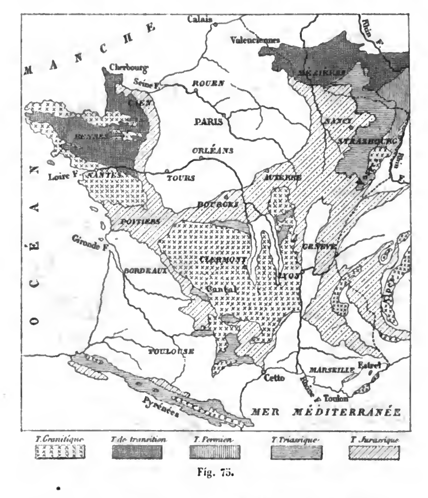


Fig. 75.

première vers Poitiers et remonte en Normandie; divers lambeaux entourent le plateau central et vont rejoindre les dépôts qui de Lyon s'étendent en Bourgogne.

TERRAIN CRÉTACÉ.

67. Sur les dépôts jurassiques relevés par le soulèvement de la Côte-d'Or se sont déposées de puissantes assises très-développées en France et que l'on désigne sous le nom de terrains crétacés ; ils peuvent se diviser en deux étages principaux.

Terrain crétacé inférieur. — Cet étage se compose de plusieurs dépôts très-distincts entre eux et que l'on connaît sous les noms de terrains wealdiens, de terrains néocomiens, de gault, de craie chloritée et de craie tuffeau.

Dépôts wealdiens. — A la partie inférieure de l'étage inférieur on trouve, en Angleterre, des couches qui se sont déposées au sein des eaux douces. Ce sont les premières de ce genre que nous ayons eu à signaler. Ces dépôts appelés *wealdiens* renferment divers débris de végétaux, des coquilles fluviatiles telles que des *paludines*, des *unios*, des *anodontes* et un reptile gigantesque, l'*iguanodon*, voisin des iguanes et qui avait plus de 20 mètres de long. Cet animal, lourd et massif, paraît avoir été herbivore.

68. *Dépôts néocomiens.* — Ces dépôts sont composés de sables, de marnes, de calcaires jaunâtres, puis d'argiles grises. Sur certains points on y trouve d'abondants amas de minerais de fer que l'on exploite dans l'Aube et la Haute-Marne. Cette formation, désignée quelquefois sous le nom de *grès vert inférieur*, se retrouve dans la Champagne, en Picardie, dans le Boulonnais, en Bourgogne, en Franche-Comté et dans le Languedoc, le Dauphiné et la Provence, où il ne se compose presque que de calcaires compactes très-fossilifères.

Les couches sableuses néocomiennes affleurent sur divers points et particulièrement sur les confins de la Champagne ; elles sont comprises entre deux couches d'argile, l'une fournie par l'argile de Kimmeridge, l'autre par le gault ; les eaux qui s'y infiltrent forment une vaste nappe d'eau souterraine qui s'étend sous le bassin de Paris et alimente les puits artésiens de Grenelle et de Passy. (Voy. parag. 17, *fig.* 12.)

Les fossiles les plus caractéristiques de cette époque sont des oursins : le *Spatangus retusus* (*fig.* 76), des huitres, l'*ostrea aquila*, des mollusques céphalopodes d'une forme toute parti-

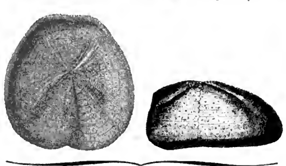


Fig. 76. — *Spatangus retusus.*

culière connus sous le nom de *ancyloceras*, *hamites* (*fig.* 77), *ptycoceras* (*fig.* 78), etc.

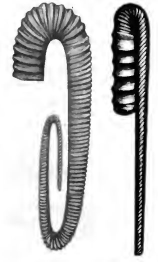


Fig. 77. *Hamites*. Fig. 78. *Ptycoceras*.

69. *Gault*. — Au-dessus vient une assise argileuse connue sous le nom de *gault*, riche en débris de céphalopodes analogues aux précédents et parmi lesquels il faut citer les *scaphites*.

70. *Craie chloritée*. — Le gault est recouvert par des sables jaunâtres remplis de grains de matière verte appelée *chlorite*. Ces sables deviennent de plus en plus marneux et finissent par constituer la *craie verte* ou *glauconienne*, très-développée dans les falaises des côtes de Normandie, aux environs du Havre.

71. *Craie tuffeau*. — Les assises supérieures ne renferment plus de grains verts. On les désigne sous le nom de *craie tuffeau*; cette craie se durcit à l'air et peut être employée pour les constructions, comme on le voit aux environs de Tours.

La craie chloritée et la craie tuffeau sont riches en débris organiques. On y trouve beaucoup de céphalopodes tels que des *ammonites*, des *scaphites* (*fig.* 79), des *baculites*, des *turrilites* (*fig.* 80), des *bélemnites*, des *huîtres*, de nombreuses *térébratules*, des *oursins*, etc.



Fig. 79. — *Scaphites*.

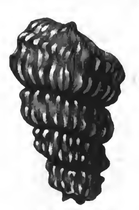


Fig. 80. — *Turrilites*.

On doit rapporter à cette même époque certaines assises crayeuses du

midi de la France entre la Rochelle, Périgueux et Bordeaux, qui renferment quelques fossiles particuliers tels que des *hippurites* (*fig.* 81) et nommées, pour cette raison, calcaires à *hippurites*.

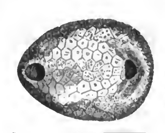


Fig. 81. — *Hippurites.*

72. **Terrain crétacé supérieur.** — *Craie marneuse.* — Au-dessus de la craie tuffeau se trouve un calcaire terreux renfermant une quantité énorme de petites coquilles microscopiques nommées foraminifères, mélangées de matières argileuses; c'est la craie marneuse. Cette assise forme la plus grande partie de la Champagne. Elle est recouverte par une craie plus compacte et renfermant un grand nombre de lits de silex ou pierre à fusil. Cette craie, ou *craie blanche*, se voit à Meudon, près Paris, où on l'exploite pour la fabrication du blanc d'Espagne ou blanc de Meudon. Ces couches sont très-riches en bélemnites. Le *belemnites mucronatus* (*fig.* 82) est abondant à Meudon. On voit aussi dans ce dépôt une huitre, l'*ostrea vesicularis*, une espèce d'oursin, l'*ananchites ovatus* (*fig.* 83), et beaucoup de *térébratules*, dont quelques-unes sont caractéristiques.



Fig. 82. *Belemnites mucronatus.*



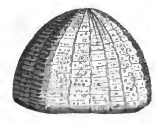


Fig. 83. — *Ananchites ovatus.*

Une espèce particulière de spondyle, le *spondylus spinosus* est remarquable par les longues épines qui hérissent une de

ses deux valves (*fig.* 84). Malgré leur fragilité, ces pointes se sont souvent conservées, et on en trouve parfois des échantillons entiers dans la craie

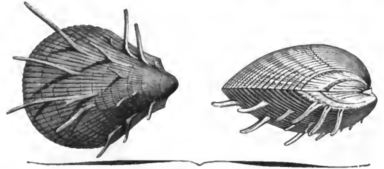


Fig. 84. — *Spondylus spinosus.*

de Meudon. Les polypiers étaient nombreux à cette époque. On a rencontré dans ces assises plusieurs espèces de bryozoaires. Enfin, on connaît de ces couches diverses empreintes de poissons.

73. On doit rapporter à la partie supérieure du terrain crétacé les dépôts de la *craie sableuse de Maëstricht*, où on a trouvé les débris d'un reptile saurien gigantesque ayant au moins 8 mètres de long, et connu sous le nom de *mosasaurus* (*fig.* 85).

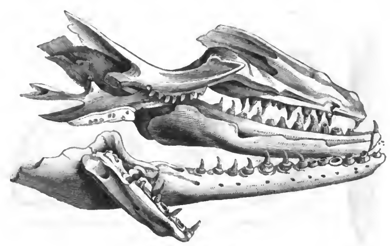


Fig. 85. — *Mosasaurus.*

Le calcaire *pisolithique*, qui se rencontre aux environs de Paris, à Meudon et à Bougival, date de la même époque.

Les terrains crétacés occupent une étendue immense à la surface de la terre. En France (*fig.* 86), ils forment autour du bassin de Paris une

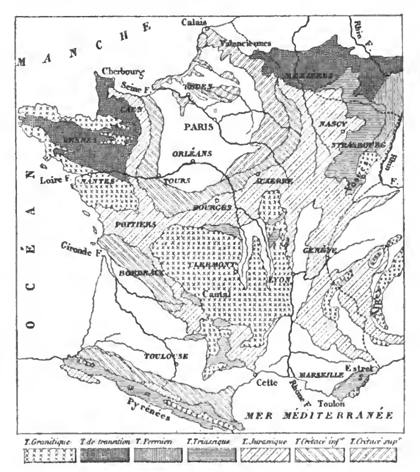


Fig. 86.

vaste ceinture qui s'étend depuis le Pas-de-Calais et l'embouchure de la Seine jusqu'au delà de la Loire ; on les retrouve à l'état de calcaire à hippurite dans le midi de la France. Ils se prolongent en Angleterre et en Irlande; ils se trouvent en Allemagne, en Suède, en Russie et sur tout le pourtour du bassin méditerranéen.

TERRAINS DE SÉDIMENT SUPÉRIEURS OU TERTIAIRES.

74. Les terrains tertiaires comprennent la série de formations qui commence au-dessus de la craie blanche et se termine aux alluvions. Les divers étages qui les composent ne sont pas, comme les terrains précédents, disposés en masses d'une étendue énorme; ils se sont formés dans des bassins indépendants, aussi peuvent-ils varier considérablement de nature, quoique formés à des époques peu différentes. Ces dépôts n'étant recouverts que par les alluvions, se montrent à nu sur un grand nombre de points du globe, aussi les a-t-on mieux étudiés que les autres.

Les terrains tertiaires ont été divisés en trois étages.

L'étage inférieur, ou *éocène*, appelé aussi terrain *parisien* parce que c'est dans le bassin de Paris qu'il est le plus développé;

L'étage moyen, ou *miocène*, appelé aussi terrain de molasse;

L'étage supérieur, ou *pliocène*, connu sous le nom de terrain subapennin.

75. **Terrain éocène ou parisien**. — Cette formation, qu'il est facile d'étudier aux environs de Paris (*fig.* 99.), se compose d'une série de dépôts tantôt marins, tantôt d'eau douce; il semble que la mer a dû successivement occuper, puis abandonner le bassin formé par la craie et que les eaux douces l'aient alors envahi.

76. *Partie inférieure*. — Les plus anciens sédiments du bassin de Paris ont une origine lacustre; ils se sont effectués dans une vaste dépression s'étendant entre Compiégne, Reims et Noyon. Ce sont des sables parfaitement blancs, connus sous le nom de *sables de Rilly* et des marnes pétries de moules de coquilles lacustres, parmi lesquelles se remarque la *physa gigantea*, associées à des hélix, à des pupa, à des paludines, etc., et, sur certains points, à des empreintes de végétaux, qui sont pour la plupart des dicotylédones.

A peu près à la même époque, la mer déposait les *sables de Bracheux* ou sables inférieurs du Soissonnais. Les eaux étaient alors très-tranquilles, comme l'indique la régularité des lits coquilliers.

Au-dessus de ces sables marins se trouvent des dépôts d'eau douce ou d'eau saumâtre représentés aux environs de Paris par les puissantes assises de l'*argile plastique* de Meudon, et dans le Soissonnais par des couches de *lignites* et d'argile où l'on rencontre des coquilles d'eau saumâtre et d'eau douce, associées à des restes de *lophiodons*, mammifères voisins des tapirs.

Des sables marins ou sables supérieurs du Soissonnais recouvrent les lignites; ils sont très-riches en fossiles, surtout en mollusques; on y trouve de nombreux gastéropodes, dont l'un, la *nerita conoïdea* (*fig.* 87),

est caractéristique de cette couche; les acéphales y sont également très-communs.

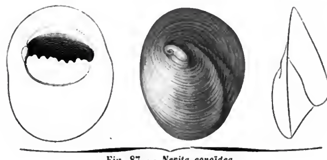


Fig. 87. — *Nerita conoïdea.*

77. *Partie moyenne.* — Viennent ensuite les couches puissantes du *calcaire grossier*, que l'on exploite autour de Paris pour en tirer la pierre à bâtir. La partie inférieure de ces calcaires renferme une quantité prodigieuse de foraminifères appartenant surtout au genre *milliolithe.*

Les coquilles ressemblent beaucoup à celles qui habitent nos mers, et on ne trouve plus ces types étranges qui diffèrent de tout ce que présente la nature actuelle; les ammonites et les bélemnites ont disparu. Au contraire, les cônes, les volutes, les harpes, les tritons, les buccins, les turbos, etc., sont très - nombreux. Une espèce de cérithe, le *cerithium giganteum* (*fig.* 88), ne se rencontre que dans les lits inférieurs du calcaire grossier. Il est remarquable par ses di-



Fig. 88. *Cerithium giganteum.* Fig. 89. *Cerithium hexagonum.* Fig. 90. *Turritella imbricataria.*

mensions, qui atteignent plus d'un demi-mètre de longueur. On peut encore citer comme fossiles caractéristiques du calcaire grossier le *cerithium hexagonum* (*fig.* 89), la *voluta spinosa*, la *turritella imbricataria* (*fig.* 90), la *cardita planicosta* (*fig.* 91), la *crassatella ponderosa* (*fig.* 92).

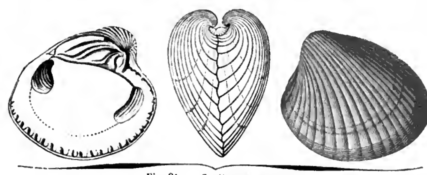


Fig. 91. — *Cardita planicosta.*

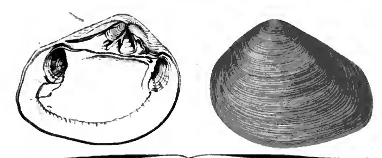


Fig. 92. — *Crassatella ponderosa.*

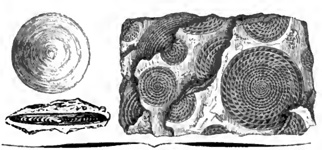


Fig. 93. — *Nummulites.*

Cette couche est également remarquable par la présence de nombreuses *nummulites;* ce sont de petites coquilles foraminifères ressemblant à une

petite pièce de monnaie, et divisées à l'intérieur en un grand nombre de chambres (*fig.* 93). On y voit aussi des dents de poissons de la famille des squales (*fig.* 94).

A l'époque du dépôt de la partie supérieure du calcaire grossier, l'action des eaux douces paraissait avoir prédominé; en effet, on trouve dans ces dépôts de nombreuses coquilles d'eau saumâtre.



Fig. 94.
Dent de Squale.

Cet état de choses ne dura pas longtemps, la mer revint occuper son ancien bassin et déposa les *sables de Beauchamp* ou sables éocènes supérieurs, très-riches en fossiles marins. On y rencontre un grand nombre de mollusques, dont beaucoup sont communs au calcaire grossier, et quelques crustacés, dont l'un, le *psammocarcinus hericarti*, est très-abondant.

78. *Partie supérieure.* — Le dépôt qui suit a été formé par les eaux douces; c'est le *calcaire siliceux* ou *calcaire de Saint-Ouen*, qui renferme une grande quantité de silice formant des amas plus ou moins volumineux. Ces calcaires sont remplis de coquilles d'eau douce; ce sont des lymnées (*fig.* 24 et 25), des planorbes, des cyclostomes.

79. **Gypse.** — De grands amas de *gypse* ou pierre à plâtre se sont formés ensuite, ils alternent avec des lits d'argile et de marnes de diverses couleurs.

Le gypse se trouve principalement dans une série de petites collines qui se dirigent de l'est à l'ouest, et dont les plus connues sont celles de *Montmartre*, de *Chaumont*, de *Montmorency*, etc.

Cette substance est généralement jaunâtre et cristalline. On trouve fréquemment à la partie inférieure de grands cristaux en fer de lance, longs de plusieurs décimètres. Par la calcination, le gypse perd son eau, devient blanc, et constitue le plâtre. Les marnes qui accompagnent cette assise sont souvent verdâtres; on y trouve quelques coquilles d'eau douce

80. C'est dans le gypse de Montmartre qu'ont été découverts les nombreux restes de mammifères qui ont permis à Cuvier de reconstituer le squelette entier de ces animaux fossiles, et de découvrir qu'ils ne se rapportaient à aucun genre aujourd'hui vivant. Je citerai principalement les *anoplotherium* et les *paleotherium*.

Les anoploterium (*fig.* 95 et 97) sont intermédiaires entre les pachydermes et les ruminants; ils avaient une queue longue et des pieds formés par un *canon* analogue à celui des ruminants. Quelques espèces devaient être aussi sveltes que nos cerfs, d'autres étaient plus massives. Quelques-unes ne dépassaient pas la taille d'un lapin.

Les paleotherium (*fig.* 96 et 97) étaient des pachydermes voisins des tapirs. Comme ces derniers, ils devaient être pourvus d'une courte

trompe. Les plus grandes espèces étaient de la taille d'un cheval, les plus petites étaient de la grosseur d'un mouton.

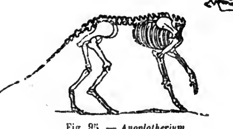


Fig. 95. — *Anoplotherium.*

On a aussi rencontré dans le gypse des restes d'oiseaux, de sauriens et de tortues.

81. Au-dessus de la formation gypseuse se trouvent

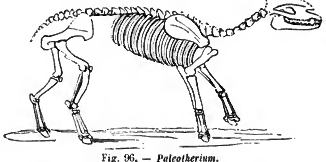


Fig. 96. — *Paleotherium.*

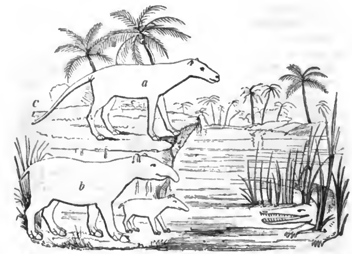


Fig. 97. — Faune de l'époque tertiaire. — *a Anoplotherium.* — *b Paleotherium.*

des assises de calcaire siliceux appelé ***calcaire de Brie***, et remarquables par les pierres meulières qu'il renferme et qui sont exploitées pour la fabrication des meules. Elles sont très-développées à la Ferté-sous-Jouarre. Les fossiles sont très-rares dans ce système. Ce calcaire paraît avoir été formé, de même que le gypse, par des sources à la fois carbonatées, siliceuses et gypseuses, qui, à cette époque, auraient été nombreuses.

82. **Division du terrain éocène en bassins.** — Le bassin parisien n'est pas le seul où le terrain éocène s'est déposé; ainsi cette formation est-elle très-développée en Angleterre; à la partie supérieure se trouvent des marnes et des argiles d'eau douce avec des restes d'anoplotherium et de paleotherium; au-dessous se trouvent, à Barton, des sables marins analogues aux sables de Beauchamp. On rencontre aussi un dépôt argileux connu sous le nom de ***London clay*** ou ***argile de Londres***. Il est principaement composé d'une argile marneuse bleue ou noirâtre, et ses fossiles ont beaucoup de rapport avec ceux du calcaire grossier parisien; on y rencontre aussi un grand nombre de crabes et d'autres crustacés, des tortues, etc. En Belgique, ce sont surtout les sables qui dominent.

83. **Terrain nummulitique.** — Dans le midi de la France, le terrain tertiaire inférieur présente un aspect tout particulier; il est remarquable par l'abondance des nummulites qu'il renferme, et qui lui ont fait donner le nom de ***calcaire à nummulites***. Ce calcaire repose ordinairement sur les couches à hippurites; tantôt il est plus ou moins terreux, tantôt compacte, et ordinairement de couleur foncée. Ce dépôt est très-abondant dans les Corbières; on le retrouve le long de la chaîne des Pyrénées, des Alpes, au mont Viso. Il existe dans le Vicentin; on le connaît sur tout le pourtour du bassin méditerranéen, en Crimée, au Caucase, en Arménie, en Égypte, où il a servi à la construction des Pyramides; enfin on le cite dans les Indes.

Indépendamment des nummulites, ces dépôts renferment beaucoup de fossiles dont un grand nombre sont identiques avec ceux du terrain parisien, et disposés dans le même ordre de succession. On y trouve les mêmes turritelles, les mêmes cérithes, etc., enfin on y rencontre une grande quantité de crabes; à Saint-Sever, dans le département des Landes, on en connaît une espèce identique à celle qui existe dans l'argile de Londres, dans le calcaire grossier parisien et dans le nummulitique d'Allemagne. Une au-

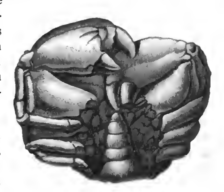
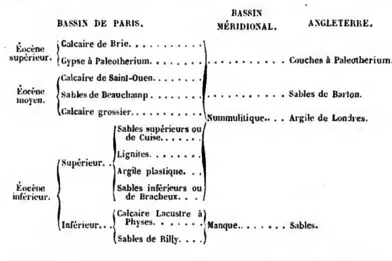


Fig. 98. – *Cancer macrochelus.*

tre espèce (*fig* 98) se trouve depuis la France et l'Allemagne jusqu'aux Indes.

Pendant longtemps on a considéré le terrain nummulitique comme appartenant au groupe crétacé, mais jamais on n'y rencontre de bélemnite ou d'ammonite caractéristique de la formation secondaire; au contraire, on y trouve beaucoup des fossiles du terrain parisien, et maintenant la plupart des géologues sont d'accord pour l'assimiler aux dépôts tertiaires inférieurs.

84. A l'aide du tableau suivant on peut facilement comprendre la succession des dépôts qui se sont formés sur différents points à l'époque éocène.



		BASSIN DE PARIS.	BASSIN MÉRIDIONAL.	ANGLETERRE.
Éocène supérieur.		Calcaire de Brie.		
		Gypse à Paleotherium.		Couches à Paleotherium.
Éocène moyen.		Calcaire de Saint-Ouen.		
		Sables de Beauchamp.		Sables de Barton.
		Calcaire grossier.	Nummulitique.	Argile de Londres.
Éocène inférieur.	Supérieur.	Sables supérieurs ou de Cuise.		
		Lignites.		
		Argile plastique.		
		Sables inférieurs ou de Bracheux.		
	Inférieur.	Calcaire Lacustre à Physes.	Manque.	Sables.
		Sables de Rilly.		

88. Si l'on jette un coup d'œil d'ensemble sur la période éocène, on voit que d'abord le bassin parisien était émergé. A cette époque existait le lac de Rilly.

La mer arriva successivement d'abord dans la Belgique, puis en France, et déposa les sables inférieurs ou sables de bracheux. — Le bassin de Paris se transforma ensuite en lagunes, et les lignites ainsi que l'argile plastique se formèrent. A l'époque des sables supérieurs du Soissonnais, du calcaire grossier et des sables du Soissonnais, la mer revint occuper son ancien lit.

Le calcaire de Saint-Ouen indique que le bassin parisien était redevenu un lac. Le gypse s'est encore formé sous l'influence des eaux douces. Tous ces changements paraissent s'être opérés tranquillement, sans cataclysme.

86. Le bassin parisien présente un ensemble de couches d'une richesse inépuisable pour les besoins de l'homme. Il n'est pas une seule de ses assises qui n'ait son utilité immédiate.



Fig. 99.

Les sables de Rilly sont employés pour la fabrication du verre.

Le calcaire lacustre à physes donne de la chaux hydraulique.

Les sables de Bracheux sont employés pour l'amendement du sol.

Les lignites et l'argile plastique fournissent les matières premières pour la fabrication des poteries.

Les sables supérieurs sont exploités comme sables et pour les verreries.

Le calcaire grossier fournit les pierres nécessaires à nos constructions.

Les sables de Beauchamp donnent d'excellents grès employés pour le pavage des rues.

Le calcaire de Saint-Ouen peut se transformer en chaux grasse

Le gypse fournit le plâtre.

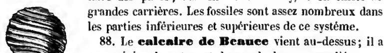
Le calcaire de Brie donne les meulières.

Enfin de nombreuses nappes d'eau souterraines sont comprises entre les couches argileuses du système éocène.

On voit donc qu'autour de Paris étaient réunies toutes les conditions géologiques nécessaires à la prospérité d'une grande ville.

TERRAIN TERTIAIRE MOYEN, DIT MIOCÈNE OU DE MOLASSE.

87. La couche de calcaire de Brie, qui termine la formation éocène, est recouverte par des dépôts de marnes, de grès et de sables marins, qui indiquent le retour de la mer, et qui se voient au sommet de presque tous les plateaux, buttes et collines des environs de Paris, à Meudon, à Sannois, à Fontenay-aux-Roses, à Montmorency. Cette formation est connue sous le nom de ***grès de Fontainebleau***, à cause du développement qu'elle présente dans cette localité. — Ces grès sont très-recherchés pour faire des pavés; aux environs d'Orsay, il en existe de grandes carrières. Les fossiles sont assez nombreux dans les parties inférieures et supérieures de ce système.



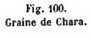


Fig. 100.
Graine de Chara.

88. Le **calcaire de Beauce** vient au-dessus; il a une origine lacustre, et donne de bonnes meulières. — Les fossiles les plus communs dans ce dépôt sont des lymnées, des planorbes (*fig.* 24 et 25), des hélices, des bulimes, etc., ainsi que des graines de chara (*fig.* 100).

89. Les **faluns** forment l'étage supérieur du terrain miocène; ils sont formés en général par un sable renfermant une quantité de coquilles fossiles. Ils sont très-développés en Touraine et aux environs de Bordeaux. — Beaucoup des espèces de mollusques que l'on trouve dans les faluns vivent encore aujourd'hui dans les mers actuelles. — On rencontre souvent, associés à ces coquilles, des ossements de mammifères qui ont été entraînés par les cours d'eau jusque sur les côtes.



Fig. 101. — Dent de Mastodonte.

90. Sur quelques points, il existe des dépôts lacustres datant de la même époque et très-riches en débris de ces mammifères; on y trouve des squelettes entiers et dont les os sont encore en connexion. Le gîte ossifère de Sansan, dans le département du Gers, appartient à cette formation. Il en est de même pour celui de Cucuron, dans le département de Vaucluse, et enfin pour celui de Pikermi, dans l'Attique. Ce sont ces couches dans lesquelles on a trouvé les restes des ***mastodontes***, animaux analogues à l'élé-

phant, mais dont les dents (*fig.* 101) sont hérissées de pointes coniques, au lieu d'être plates. On y rencontre aussi le *dinotherium* (*fig.* 102), dont la taille dépassait celle de tous les mammifères connus; il devait avoir au moins six mètres de long. Il est remarquable par l'existence de deux défenses recourbées vers le bas, qui arment sa mâchoire inférieure (*fig.* 103). A cette époque, la France était habitée par de nombreuses troupes d'antilopes, de cerfs; il y avait aussi des rhinocéros, etc.



Fig. 102. — *Dinotherium* (restauré).

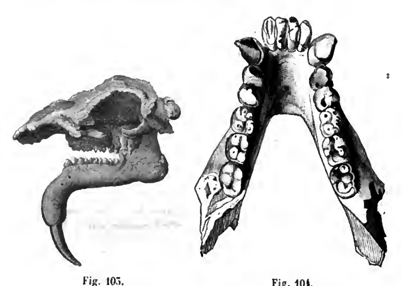


Fig. 103.
Tête de *Dinotherium.*

Fig. 104.
Mâchoire du Singe de Sansan.

Le premier singe connu date de cette époque et a été découvert à Sansan (*fig.* 104).

Le terrain de molasse se retrouve dans le midi de la France, à Aix, où il est remarquable par les empreintes d'insectes qu'il a conservées. Il est très-développé en Suisse; on y rencontre de nombreux restes de lignites,

formés par des conifères, dont on peut encore reconnaître la structure intime, en examinant le bois au microscope; on y trouve aussi des dicotylédones, vivant encore aujourd'hui, des ormes (*fig.* 105), des érables, etc.

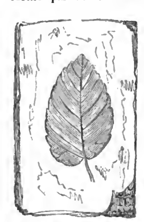


Fig. 105. — Feuille d'Orme.

La molasse renferme quelques dépôts de gypse, on en connaît à Aix, en Provence, en Catalogne, etc.

TERRAIN TERTIAIRE SUPÉRIEUR, DIT PLIOCÈNE OU SUBAPENNIN.

91. Au-dessus du miocène se sont déposées d'autres couches en stratification discordante. Les dépôts marins qui constituent les collines subapennines font partie de cette formation; elles sont formées à leur partie inférieure de marnes et en dessus de sables.

Les marnes sont bleuâtres; elles renferment de nombreuses coquilles, des turritelles, des cônes, des natices, des cérithes, etc., dont beaucoup vivent encore dans nos mers.

Les sables subapennins sont également riches en fossiles; ils renferment en abondance un gastéropode, le buccinum prismaticum (*fig.* 106), qui caractérise parfaitement cette couche.

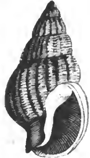


Fig. 106.

On suit ces dépôts, près de Nice, d'Antibes, de Perpignan. A Montpellier, ils sont représentés par des sables marins dans lesquels on a trouvé de nombreux restes de mammifères. Un éléphant, des mastodontes, des ours, des singes, des antilopes.

En Belgique, on retrouve les couches à ***buccinium prismaticum*** (*fig.* 106); ce dépôt, appelé ***crag d'Anvers***, est identique avec les marnes subapennines.

En Angleterre, cette formation existe dans le Suffolk et porte aussi le nom de crag.

C'est à cette époque qu'appartiennent les couches lacustres d'Œningen, près du lac de Constance, célèbres par les reptiles, les insectes et les végétaux que l'on y a trouvés.

TERRAINS DE TRANSPORT.

Diluvium et blocs erratiques. — Cavernes à ossements et brèches osseuses. — Formation de la couche superficielle du sol ou terre arable. — Phénomènes actuels de transport.

92. **Diluvium.** — A la fin de la période tertiaire, de grands mouvements paraissent avoir eu lieu à la surface de la terre, des courants

impétueux ont profondément sillonné le sol, l'ont raviné, y ont creusé des vallées et ont donné à la terre son relief actuel. Ils ont arraché aux roches des pays qu'ils traversaient des fragments plus ou moins volumineux, des sables, de la vase qu'ils ont ensuite laissé déposer pêle-mêle avec les ossements des animaux qu'ils avaient entraînés dans leur cours. Cette accumulation a formé les *terrains de transport* appelés aussi *terrains diluviens, diluvium, terrains quaternaires*; ils sont surtout considérables dans les vallées, cependant ils forment souvent de grands plateaux, celui du bois de Boulogne, par exemple. Ces phénomènes ont mis une longue suite de temps à s'effectuer.

93. **Blocs erratiques.** — Dans les contrées boréales de notre hémisphère et jusqu'en Allemagne, il arrive souvent que l'on rencontre d'énormes blocs différant complétement par leur nature minéralogique des roches du pays où ils se trouvent. On désigne ces blocs sous le nom d'*erratiques*. Plus on remonte vers le nord, plus ils sont abondants; enfin on arrive ainsi au massif dont ils ont été arrachés. En Scandinavie, en Danemark, le sol en est presque couvert; en Russie et en Allemagne ils sont plus rares. Leurs contours ne sont pas émoussés, ce qui prouve qu'ils n'ont pas été roulés par les cours d'eau, supposition que leur grosseur rendrait d'ailleurs invraisemblable.

94. On a cherché à expliquer ces phénomènes de transport de différentes manières. Quelques géologues ont pensé qu'ils avaient été produits par d'immenses glaciers qui, à l'époque quaternaire, auraient couvert comme d'une vaste calotte tout le Nord, et qui, après avoir arraché des blocs aux masses des roches primitives de la Finlande et de la Scandinavie, les auraient ainsi transportés au loin.

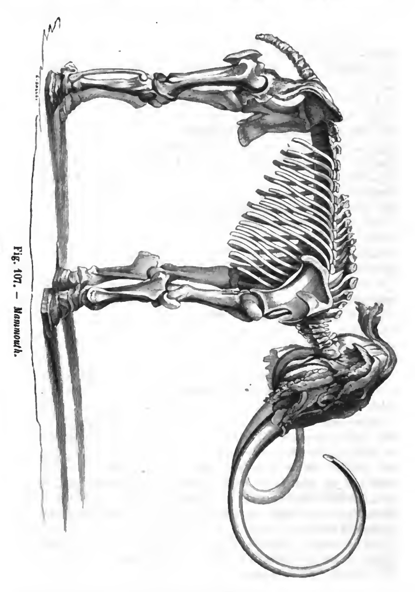
D'autres ont supposé qu'à l'époque diluvienne la mer couvrait le nord de nos continents, et que les blocs erratiques ont été transportés par des bancs de glaces flottantes.

Ces deux explications peuvent se trouver vraies; en effet, il est bien évident que sur certains points les roches erratiques ont été portées sur des glaciers; en effet, on voit en Suisse et jusqu'au Jura les traces d'un vaste glacier qui devait occuper une étendue énorme et qui, dans sa marche, a poli et strié les roches sous-jacentes. D'autre part, dans le Nord, les blocs erratiques auraient plutôt été transportés par des glaces flottantes, car, sur beaucoup de points, on trouve à côté d'eux des dépôts marins qui attestent l'existence de la mer sur ces contrées.

C'est au milieu de l'époque diluvienne que s'est ouvert le canal de la Manche; avant ce moment l'Angleterre faisait partie du continent.

95. **Faune diluvienne.** — Les couches qui se sont formées pendant cette période renferment une grande quantité de mammifères fossiles dont les uns vivent encore aujourd'hui dans les mêmes localités, dont d'autres ont émigré sous d'autres climats, et enfin dont les derniers

ont complétement disparu. Parmi les fossiles que l'on trouve en France, on doit citer en première ligne l'*elephas primigenius* ou *mammouth* (*fig.* 107),


Fig. 107. — *Mammouth.*

qui se rencontre sur presque tous les points de notre continent et est si abondant en Sibérie que ses défenses fossiles sont l'objet d'un commerce

important. Cette espèce d'éléphant était remarquable par l'existence d'une épaisse toison qui couvrait son corps et le protégeait contre le froid des contrées qu'elle habitait. Le *rhinocéros tichorinus* présentait la même particularité d'organisation. On a pu constater ce fait curieux par la découverte que l'on a faite de cadavres de ces animaux, conservés en Sibérie dans des blocs de glace, dans un tel état que les chiens ont pu se nourrir de leurs chairs.



Fig.108. — *Mylodon robustus.*

En Amérique, ces ossements se trouvent associés à ceux du *megatherium*, animal gigantesque voisin des édentés, et du *mylodon* (*fig.* 108), qui se rapporte au même groupe, du *glyptodon* (*fig.* 109), autre édenté dont le

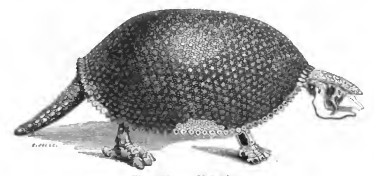


Fig. 109. — *Glyptodon.*

corps était couvert d'une carapace analogue à celle des tatous, mais dont la taille égalait celle de nos plus grands rhinocéros. A côté de ces êtres

se trouvent des rhinocéros, des hippopotames, de grands carnassiers, tels que des tigres, des hyènes, d'énormes ours, des cerfs dont la taille dépassait de beaucoup celle des plus grands représentants actuels de cette espèce, et dont les bois mesuraient jusqu'à quatre mètres d'envergure, des antilopes, des rongeurs, etc.

96. **Cavernes à ossements et brèches osseuses.** — C'est à l'époque diluvienne que les débris des animaux que nous venons de citer ont été entraînés par des cours d'eau et se sont accumulés dans les cavernes, et dans les fentes qui sont alors désignées sous le nom de *brèches osseuses*. La plupart de ces cavernes présentent des ouvertures latérales, des couloirs, par où se sont introduites les eaux qui charriaient à la fois des ossements, des limons, des sables, des graviers; le tout s'est accumulé, et les débris des mammifères se trouvent au milieu d'une couche épaisse de terreau dont la surface a ordinairement été solidifiée et cimentée par du carbonate de chaux que laissaient déposer les eaux qui suintaient le long des parois des cavernes.

Presque toujours les os sont fracturés, et on ne trouve jamais de squelette complet. La majeure partie appartiennent à des carnassiers; en Allemagne et en Belgique, ce sont les ours qui dominent (*fig.* 110); en

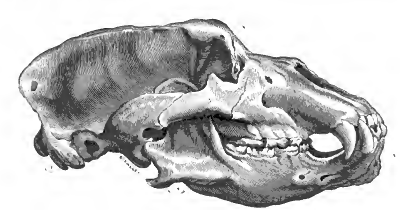


Fig. 110. — *Ursus spelæus.*

Angleterre, ce sont les hyènes. On y trouve également des restes de renards, de putois, de belettes, de martes, de gloutons, d'éléphants, de rhinocéros, d'hippopotames, de sangliers, de chevaux, de cerfs, de rennes, de bœufs, de lièvres, de rats, de campagnols.

En Amérique, les cavernes renferment des ossements des grands édentés dont nous avons parlé plus haut.

97. Quelques-unes de ces cavernes semblent avoir servi de refuge à l'homme. On y trouve les débris de son industrie naissante, consistant

en instruments fabriqués avec des silex ou avec les ossements des animaux diluviens. Mais il est difficile de prouver d'une manière positive que ces objets n'aient pas été déposés postérieurement à l'époque quaternaire. Quelques rares cavernes à ossements paraissent avoir servi de repaire à des bêtes fauves qui y auraient accumulé les restes de leur repas ; dans ce cas, les ossements portent les traces des dents qui les ont rongés.

Les cavernes à ossements se trouvent plus particulièrement dans le calcaire jurassique ; elles sont rares dans la craie, et enfin il n'en existe plus dans les dépôts supérieurs.

98. **Formation de la couche superficielle du sol ou terre arable. — Phénomènes actuels de transport.** — Lorsque les grands courants diluviens eurent donné au sol son relief actuel, tout rentra dans le repos et l'époque actuelle commença, caractérisée par la présence de l'homme. Maintenant, et sous nos yeux, commence une nouvelle époque ; des dépôts se forment au sein des mers, les fleuves charrient du limon qui se dépose à leur embouchure pour former des deltas et englobe les coquilles terrestres et fluviatiles dont les eaux roulent les débris.

Des polypiers se développent au milieu de la mer et forment des récifs et des îles madréporiques. Enfin, certaines côtes se soulèvent lentement. Celles de Suède, par exemple. Près de Stockholm on a trouvé, en creusant un canal au milieu des lits de sable, d'argile et de marne, remplis de coquilles identiques à celles de la mer Baltique, les débris d'un vaisseau et une cabane en bois.

Des glaciers arrachent aux flancs des montagnes des blocs qu'ils transportent avec eux et amoncellent à leur pied, après avoir, dans leur marche lente et régulière, strié et poli les roches qui forment leur lit.

Les sources jaillissantes ou geysers d'Islande accumulent des dépôts de silice, d'autres forment des amas de carbonate, de chaux. Les végétaux, en se décomposant sous les couches d'argile, se transforment lentement en lignite et en houille.

Tous ces phénomènes ont lieu tranquillement, sans bouleversements, et préparent pour l'avenir une formation géologique supérieure à toutes celles que nous venons d'examiner.

99. **Terre arable.** — On appelle sol, ou *terre arable, terre végétale,* la couche terrestre superficielle qui est propre à la culture des plantes ; elle résulte de la décomposition et de la désagrégation des roches qui se montrent à la surface du sol. Cette décomposition a été opérée par l'action simultanée de l'eau et de l'air et par les variations de température. La végétation a aussi contribué à la formation des sols arables, par les détritus organiques qu'ils fournissaient. Les éléments principaux de la terre végétale sont au nombre de quatre :

1° Le sable ; — 2° l'argile ; — 3° le calcaire ; — 4° l'humus ou terreau.

Ces matières, mélangées en différentes proportions, forment la variété des sols, qui, suivant que l'une ou l'autre de ces substances prédomine, sont désignés sous le nom de ***sols sableux***, ***sols argileux***, ***sols calcaires***.

Le sable donne de la perméabilité au terrain.

L'argile, par sa compacité, retient l'eau et les divers engrais, sert à donner de la cohésion au sol et permet aux racines de s'y fixer solidement.

Le calcaire absorbe l'eau et la retient, il sert en outre à diviser les particules argileuses, qui formeraient, sans cela, une couche imperméable.

L'humus ou le terreau, c'est-à-dire les engrais provenant de la décomposition des matières organiques, fournissent aux plantes la matière azotée qui leur est nécessaire, ainsi qu'une portion du carbone.

Indépendamment de ces éléments principaux, le sol arable doit renfermer des substances salines dont l'action paraît indispensable au développement d'une végétation puissante. Les phosphates alcalins et terreux, de même que les sels de potasse, jouent un rôle important dans les phénomènes de nutrition des plantes, et doivent se trouver dans le sol; il en est de même pour le silicate de potasse.

Lorsqu'une terre arable ne présente pas toutes les qualités requises pour l'agriculture, on peut modifier sa nature en y ajoutant les éléments qui leur manquent, en l'***amendant***. Les engrais employés à cet usage peuvent être minéraux ou organiques, suivant que la présence de tel ou tel principe se trouve plus ou moins nécessaire.

SOULÈVEMENTS.

Époques relatives de soulèvement des principales chaînes de montagnes.

100. Nous avons déjà vu (paragr. 50) que, sous l'influence des roches ignées, les terrains stratifiés ont souvent été relevés, soulevés et disloqués. Lorsque nous rencontrons ces couches, il nous est difficile de savoir de quelle époque date le mouvement qui les a ainsi dérangés de leur position horizontale; mais si, au pied de ces couches, nous trouvons d'autres dépôts (*a*, *b*, *c*, *fig.* 111) régulièrement et horizontalement stratifiés, nous pouvons en conclure que le redressement a eu lieu et était terminé avant la formation de ces derniers, et si nous pouvons déterminer leur âge relatif, nous arrivons approximativement à l'âge du soulèvement.

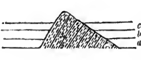


Fig. 111.

Supposons, par exemple, qu'un massif de granit (*fig.* 112) (*g*) ait soulevé des couches de terrain triasique (*a*), et que sur ces dernières reposent en

couches horizontales des sédiments jurassiques (*b*). Il est évident que le soulèvement qui aura produit ce résultat, aura eu lieu lorsque le trias était déjà déposé et avant que l'époque jurassique ait commencé ; il vient donc se placer entre ces deux époques.

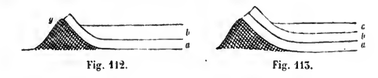


Fig. 112. Fig. 113.

Si l'on trouve le terrain crétacé (*fig.* 113) (*c*) reposant en couches horizontales sur le trias (*a*) et le terrain jurassique (*b*), le soulèvement devra se placer à la fin de cette dernière période géologique, et avant le dépôt des couches crétacées.

C'est en observant ainsi avec soin les discordances de stratification que M. Élie de Beaumont est arrivé à pouvoir déterminer l'âge relatif des principales chaînes de montagnes.

La direction des couches relevées indique l'alignement et la direction que les soulèvements ont suivis, et montre que ces phénomènes ont eu lieu sur une bande de terrain plus ou moins large, où ils ont déterminé la formation de plusieurs crêtes parallèles.

On appelle ***système de soulèvement*** l'ensemble des dislocations sur une même ligne et dans des directions parallèles. On dit, par exemple, le système des Alpes, le système des Pyrénées. Nous allons indiquer l'ordre chronologique des principaux systèmes de soulèvement.

101. **Soulèvement du système de la Vendée.** — Ce soulèvement est le plus ancien; il se manifeste par des redressements de schistes et de micaschistes qui ont eu lieu avant le dépôt des terrains cambriens (*fig.* 114).

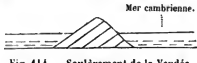


Fig. 114. — Soulèvement de la Vendée.

102. **Soulèvement du système du Morbihan.** — Les schistes et les gneiss ont été redressés avant les dépôts siluriens, qui reposent sur eux en couches horizontales.

103. **Système de soulèvement du Hunsdruck.** — Il se place entre l'époque des dépôts siluriens et le terrain devonien.

104. **Système de soulèvement des ballons.** — Ce sont les couches du terrain devonien qui sont relevées et le terrain houiller s'est déposé ensuite. Ce système est dirigé dans le sens de l'allongement de la Bretagne; il a relevé les ballons des Vosges, etc.

105. **Système de soulèvement de la Côte-d'Or.** — Les couches jurassiques sont redressées et le terrain crétacé inférieur s'est formé

en couches horizontales sous les eaux qui battaient leurs pentes et leurs escarpements. Ce système se montre en France depuis le pays de Luxembourg jusqu'à la Rochelle et dans toutes les crêtes du Jura.

106. **Système de soulèvement du mont Viso.** — Ce système, très-apparent dans les Alpes du Dauphiné, a relevé les couches jurassiques et crétacées inférieures, et son action s'est éteinte avant la formation du crétacé supérieur. C'est ce soulèvement qui a déterminé la principale direction des côtes d'Italie et de Grèce.

107. **Système de soulèvement des Pyrénées.** — Dans ce système, le terrain crétacé supérieur (*fig.* 115) se trouve relevé jusqu'à des hauteurs parfois considérables, et le dépôt qui s'est formé ensuite constitue le commencement des terrains tertiaires. A cette époque, la plus grande partie de notre continent a été élevée au-dessus des eaux.

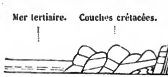


Fig. 115. — Soulèvement des Pyrénées.

Le soulèvement des Pyrénées françaises et espagnoles, des Apennins, des Alpes Juliennes, des Karpathes, des Balkans, appartient à ce système.

108. **Soulèvement du système des Alpes occidentales.** — Les couches de terrain de molasse ont été relevées à de grandes hauteurs aussi bien que les couches crétacées et jurassiques. Les seules couches horizontales sont celles des terrains subapennins, représentés en France par les dépôts lacustres de la Bresse et de la Provence. Ce soulèvement a été produit par une éruption de granits qui constituent le mont Blanc, le mont Rose, etc. Ces granits auraient donc paru à une époque plus récente que la meulière coquillière des environs de Paris.

109. **Soulèvement du système des Alpes principales.** — Les couches tertiaires les plus supérieures sont relevées, le diluvium seul repose en stratification horizontale. Ce sont à la fois les porphyres ou mélaphyres qui ont redressé ainsi les dépôts tertiaires du Piémont et de la Provence; les montagnes qui s'étendent du Valais au Saint-Gothard jusqu'en Autriche ont été soulevées à cette époque. La plus grande partie du sol de l'Europe participa à ce mouvement.

110. **Soulèvement du système du Ténare.** — Ce soulèvement est le plus récent qui ait eu lieu à la surface de la terre; les couches diluviennes s'étaient déjà déposées. Le Vésuve, l'Etna, le Stromboli paraissent s'être formés à la même époque.

SUCCESSION GÉNÉRALE DES ÊTRES ORGANISÉS ET CHANGEMENTS DE FORME DE LA SURFACE DE LA TERRE PENDANT LES DIVERSES PÉRIODES GÉOLOGIQUES.

111. Comme nous l'avons déjà vu par ce qui précède, la configuration de la surface du globe a été le théâtre de nombreux changements; tantôt elle a été baignée par la mer, tantôt par les eaux douces, tantôt elle était plus ou moins complétement émergée. Chacune des grandes périodes géologiques a été caractérisée par des espèces animales ou végétales qui, pour la plupart, ne se rencontrent pas ailleurs.

112. A l'époque silurienne, la mer semble avoir occupé la plus grande partie de la portion connue du globe.

En France, il existait entre Brest et Saint-Malo, et entre Brest et Poitiers, deux grandes îles granitiques; le plateau central était au-dessus des eaux. Il existait aussi quelques terres dans les Vosges et dans les Pyrénées. Les mers étaient peuplées de mollusques, de zoophytes et de crustacés dont nous avons parlé sous le nom de ***trilobites*** (Voy. *fig.* 33) Les roches émergées étaient alors probablement trop arides pour permettre aux animaux et aux végétaux d'y vivre.

113. Le système du Hunsdruck, en soulevant les couches sédimentaires siluriennes, a augmenté la surface des terres déjà existantes; les Ardennes, l'Eiffel, le Hunsdruck ont paru. L'espace compris entre Cherbourg et la Bretagne a été comblé, la Scandinavie a pris un grand accroissement.

A cette époque, les crustacés, les mollusques et les zoophytes sont encore très-abondants; les poissons sont en assez grand nombre, ils appartiennent surtout à la famille des squales. Enfin on connaît des reptiles de cette époque. La végétation a pris de suite un grand accroissement, comme le montrent les couches de combustible que renferment le terrain devonien.

114. Le système des ballons a relevé les couches devoniennes et a augmenté la surface des terres. La Bretagne et le plateau central se sont réunis. Entre Cologne et Dublin s'est formée une grande île; ce mouvement s'est fait sentir en Écosse, en Scandinavie et en Russie. C'est alors que se sont formés les dépôts marins de l'époque carbonifère, et les accumulations de houille qui, probablement, se faisaient dans de petites dépressions du sol. La végétation était alors très-puissante, elle se composait de lycopodiacées, de fougères, de conifères.

115. A l'époque permienne, la partie la plus occidentale de l'Europe est soulevée. La plupart des îles de l'Angleterre se sont réunies pour former avec le continent une vaste terre ferme. La mer de cette époque s'étendait dans la Thuringe et le Mansfeld, ainsi que dans toute la partie

orientale de la Russie. La terre était habitée alors par de grands sauriens voisins des monitors. Les mers étaient riches en mollusques et en poissons.

116. A l'époque triasique, une grande île s'étendait à travers la France, de l'Angleterre jusqu'en Autriche, comprenant la Bretagne, le Limousin, le Forez. Une autre île renfermant la Belgique s'étendait dans les Vosges.

A cette époque, la végétation était très-puissante ; et si les fougères et les équisétacées ont considérablement diminué ; les conifères sont beaucoup plus nombreux. Des batraciens, les labyrinthodontes, habitent la terre ; enfin on connaît un mammifère de cette époque.

117. Le terrain triasique a été soulevé et a constitué différentes îles, et les continents déjà formés se sont augmentés. Mais en même temps il se faisait de grands affaissements, et la grande île qui s'étendait à travers la France, de l'Angleterre à l'Autriche, se trouva coupée vers Poitiers. Les dépôts jurassiques formés alors sont très-étendus en France, où on peut facilement suivre leurs rivages. A cette époque, les grands sauriens que nous avons fait connaître sous le nom d'ichthyosaures (*fig.* 64), de plésiosaures (*fig.* 65) et de ptérodactyles (*fig.* 66), peuplaient les

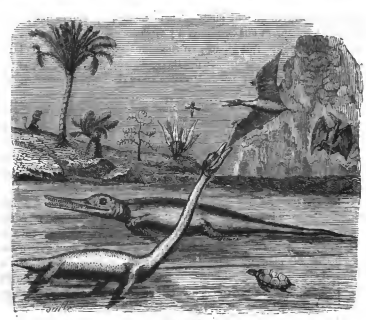


Fig. 116.

mers (*fig.* 116). Les productus et les spirifères avaient complétement disparu, mais y avait encore de nombreuses térébratules et un grand nom-

bre de mollusques céphalopodes, des ammonites (*fig.* 63), des bélemnites (*fig.* 60); enfin il existait sur le continent de petits mammifères marsupiaux.



Fig. 117.

118. Le soulèvement de la Côte-d'Or a relevé une partie des dépôts jurassiques. Il se forma une vaste terre qui s'étendait depuis l'Écosse jusqu'au plateau central, remontant jusqu'à Leipzig et Bruxelles, formant un vaste golfe comprenant le bassin parisien. La Touraine, la Champagne, dans lesquels se déposaient les couches crétacées, le Bordelais et la Gascogne ainsi que la Provence étaient alors sous les eaux. A cette époque,

les ammonites et les bélemnites peuplaient encore les mers, associés à d'autres céphalopodes, tels que les hamites, les scaphites, les baculites ; des reptiles habitaient les terres. Le soulèvement du mont Viso combla en partie le canal de Perpignan et le golfe de Marseille, mais n'amena que peu de changement dans le lit des mers ; c'est alors que se déposèrent les couches crétacées supérieures.

119. Le soulèvement des Pyrénées donna presque au sol son relief actuel, cependant le golfe parisien resta ouvert ainsi qu'un golfe s'étendant entre Bordeaux et Dax. C'est à cette époque que se déposèrent les terrains tertiaires et le terrain nummulitique. Les ammonites et les bélemnites ne dépassent pas le terrain crétacé. Les grands sauriens n'existaient plus, les reptiles n'étaient représentés que par des crocodiles, des tortues, etc. De nombreux mammifères, analogues aux tapirs, habitaient la terre. Des mollusques, analogues à ceux qui vivent encore aujourd'hui, peuplaient la mer. A l'époque miocène se sont montrés les mastodontes, les dinothériums, les rhinocéros, les singes, les rongeurs, etc.; la même faune a vécu pendant la période pliocène; on y trouve aussi des éléphants. Enfin, le soulèvement des Alpes principales mit fin à cette formation; le continent prit la forme que nous lui connaissons aujourd'hui.

120. C'est alors que se firent les grands courants diluviens qui creusèrent nos vallées, c'est alors que le canal de la Manche se creusa et que l'Angleterre fut séparée de la France.

Le continent était habité par de grands carnassiers, des ours, des tigres, des hyènes, par des éléphants, des hippopotames, des rhinocéros, par des ruminants, tels que des cerfs gigantesques (*fig.* 117), des rennes, des bœufs. C'est à la fin de cette époque que l'homme est apparu sur la terre. Les alluvions modernes ont commencé à se former et à accumuler dans leurs couches les débris de la faune et de la flore actuelles.

TABLE DES MATIÈRES

SCIENCES PHYSIQUES

PHYSIQUE

LIVRE PREMIER.

PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

CHAPITRE II.

CHAPITRE III.

CHAPITRE IV.

CHAPITRE V.

LIVRE II.

CHALEUR.

CHAPITRE PREMIER.

CHAPITRE IV.

CHAPITRE V.

LIVRE IV.

ACOUSTIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

CHAPITRE II.

LIVRE V.

OPTIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

CHAPITRE II.

CHAPITRE III.

CHIMIE

CHIMIE ORGANIQUE.

—

CHAPITRE PREMIER.

CHAPITRE II.

CHAPITRE III.

CHAPITRE IV.

CHAPITRE V.

CHAPITRE VI.

CHAPITRE VII.

SCIENCES NATURELLES

ZOOLOGIE

BOTANIQUE

GÉOLOGIE

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.